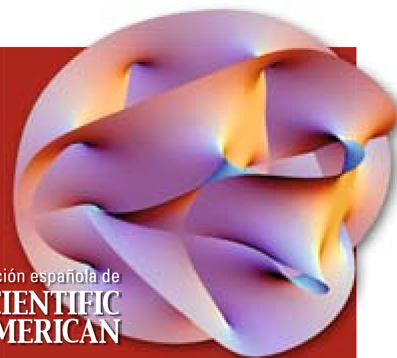
OCTUBRE 2009

INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



GALILEO
Cielo y tierra en un solo mundo

ECOLOGIA
Los nuevos límites del crecimiento

MEDICINA
Celiaquía: más allá del gluten

FISICA
¿Demostrará el LHC la teoría de cuerdas?

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

NEANDERTALES

¿Por qué se extinguieron?



SUMARIO

Octubre de 2009/ Número 397



Formas insospechadas de moverse en el vacío.



¿Dónde se podrán guardar los residuos nucleares de alta actividad?



El gluten no es el único factor que desencadena la enfermedad celíaca.

ARTICULOS

EVOLUCION HUMANA

16 La extinción de los neandertales

Kate Wong

El hombre moderno y el neandertal coexistieron en Europa durante miles de años. ¿Por qué desaparecieron unos homínidos tan semejantes a nosotros?

RELATIVIDAD GENERAL

22 Aventuras en el espaciotiempo curvo

Eduardo Guéron

La posibilidad de "nadar" y "planear" en un espacio curvo y vacío muestra que, pasados más de noventa años, la teoría de la relatividad general de Einstein sigue sorprendiendo.

ENERGIA

30 Residuos nucleares: ¿nuevas soluciones?

Matthew L. Wald

El monte Yucca era la solución propuesta para el problema de EE.UU. con los residuos nucleares. Transcurridos 22 años, esa idea se ha desvanecido. Ahora, según algunas voces, la solución más inteligente a corto plazo sería no hacer nada.

MEDICINA

40 Causas de la enfermedad celíaca

Alessio Fasano

Gracias al estudio de esta patología provocada por los alimentos se ha descubierto un proceso que quizás actúe en numerosas enfermedades autoinmunitarias.

HISTORIA

49 Dos mundos, una física

Jochen Büttner

Galileo y sus contemporáneos superaron la estricta separación entre una física del firmamento y otra de la Tierra que había dominado el pensamiento transmitido desde la antigüedad griega.

FISICA DE ALTAS ENERGIAS

60 La teoría de cuerdas y el LHC

Luis E. Ibáñez

La teoría de cuerdas es la candidata más firme a teoría unificada de las interacciones de la naturaleza. El gran colisionador de hadrones, LHC, de Ginebra, podría dar importante información experimental sobre su validez.

16

¿Tuvo algo que ver *Homo sapiens* con la desaparición de los neandertales?



¿Se podría contrastar la teoría de cuerdas en el LHC?



El crecimiento de la población y la economía quizá se tope pronto con la finitud de los recursos.

ECONOMIA

69 Los límites del crecimiento tras el cenit del petróleo

Charles A. S. Hall y John W. Day, Jr.

En los años setenta, el interés se centraba en el crecimiento demográfico mundial y la limitación de los recursos disponibles para sostenerlo. La cuestión perdió actualidad, pero es hora de volver a pensar en ella.

MATERIALES

78 Claves de la superconductividad a altas temperaturas

Graham P. Collins

Se ha descubierto que los pnicturos de hierro superconducen a 50 grados sobre el cero absoluto. El hallazgo reaviva la búsqueda de mejores superconductores de alta temperatura y arroja luz sobre el fenómeno.

SECCIONES

3 HACE...
50, 100 y 150 años.

4 PUESTA AL DIA
Cuasicristales naturales... Memoria de muy larga duración... Sólo con proteínas... Exploración de Marte.

6 APUNTES
Arqueología... Física... Cambio climático... Zoología... Biología... Fluidos.

8 CIENCIA Y SOCIEDAD
La silenciosa pandemia de las abejas... Pnicturos de hierro... Iluminación cuántica.

38 DE CERCA
Defensa imposible, por *Anna Gili, Mercè Rodríguez y Josep-Maria Gili*

86 TALLER Y LABORATORIO
Convección de Bénard, por *Marc Boada*

89 DESARROLLO SOSTENIBLE
Buenas noticias sobre el control de la malaria, por Jeffrey D. Sachs

90 JUEGOS MATEMATICOS
Viajes a través del tiempo, por *Agustín Rayo*

92 IDEAS APLICADAS
Cánulas vasculares, por *Mark Fischetti*

94 LIBROS
Vísperas galileanas. Luz de velocidad variable.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

ACTING EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Davide Castelvecchi, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Stuart F. Brown, W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Christie Nicholson, Michelle Press, John Rennie, Michael Shermer, Sarah Simpson
ART DIRECTOR Edward Bell
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Kevin Hause
VICE PRESIDENT, OPERATIONS AND ADMINISTRATION Frances Newburg
VICE PRESIDENT, FINANCE AND GENERAL MANAGER Michael Florek

DISTRIBUCION

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid) - Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Carlos Lorenzo: *La extinción de los neandertales*; Ramón Pascual: *Aventuras en el espaciotiempo curvo*; J. Vilardell: *Residuos nucleares: ¿nuevas soluciones?*, *Hace...* e *Ideas aplicadas*; Juan Manuel González Mañas: *Causas de la enfermedad celíaca*; Ernesto Lozano Tellechea: *Dos mundos, una física*; Luis Bou: *Puesta al día* y *Apuntes*; Bruno Moreno: *Apuntes* y *Ciencia y sociedad*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*; Ramón Muñoz Tapia: *Taller y laboratorio*



Portada: Jean-Francois Podevin

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	100,00 euro	190,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Printer Industria Gráfica Ctra. N-II, km 600 - 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

...cincuenta años

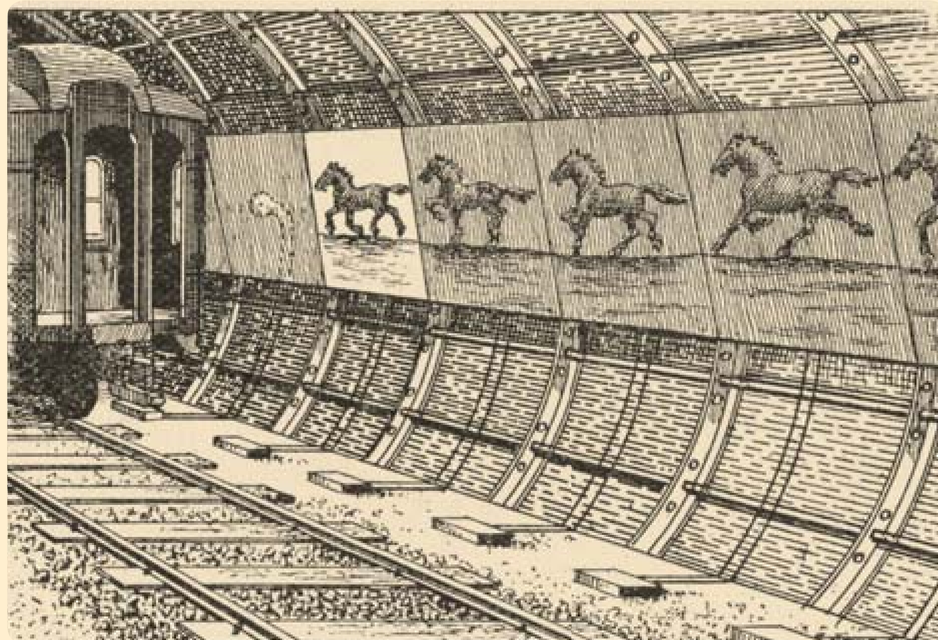
El iniciador de los trasplantes de riñón. «Los injertos entre gemelos idénticos han demostrado que allá donde no hay barreras inmunitarias es posible trasplantar riñones con éxito para sanar enfermedades renales y vasculares incurables. Hemos trasplantado un riñón de un hombre sano a su hermano, enfermo de uremia grave. Aunque los hombres no eran gemelos idénticos, esperábamos que su parentesco pudiera favorecer cierta inmunocompatibilidad. El receptor recibió una dosis total de rayos X suficiente para ejercer un severo efecto depresivo en el tejido reticuloendotelial. Conforme el sistema reticuloendotelial del enfermo se recupere de la irradiación, quizá se vea obligado a familiarizarse con los antígenos y el riñón trasplantado. Es aún demasiado pronto para evaluar los resultados de este trasplante, pero en principio parece haber tenido éxito. —John P. Merrill»

Metro con espectáculo. «El cinematógrafo se consigue —es bien sabido— con un filme que se mueve de forma intermitente ante un proyector o linterna, que arroja sobre la pantalla imágenes sucesivas. El mismo efecto se conseguiría con unas figuras inmóviles y un público que se moviera de manera que viese las imágenes sucesivamente. Un ingenioso inventor ha dado con ese método para aliviar la monotonía de los viajes en el ferrocarril metropolitano subterráneo. Propone instalar una banda continua de figuras a cada costado del túnel, figuras que se iluminarían de modo secuencial mediante unas lámparas situadas tras ellas. La ilustración muestra el procedimiento para conseguir ese resultado.»

—El "Masstransiscope", instalado en el metro de Nueva York en septiembre de 1980, hace uso del efecto zeotrópico. Hay vídeos disponibles en Google y YouTube.

...cien años

Electrocultivo. «El rápido crecimiento de las plantas en las regiones polares se ha venido atribuyendo a la ausencia de noche durante los tres meses de verano, pero urge abandonar tal explicación. El profesor Lemstroem, de la Universidad de Helsingfors, Finlandia, encuentra varias causas para creer que ese rápido crecimiento que se da en el Artico se halla en las corrientes eléctricas que fluyen entre la tierra y la atmósfera, y producen el fenómeno de las auroras boreales. Las puntiagudas hojas de las coníferas y las aristas de las espigas de cereales facilitan la transmisión de las corrientes a través de esas plantas; tal función ofrece una causa para la existencia de esas peculiaridades.»



UN DECORADO ARTIFICIAL alivia el aburrimiento del trayecto diario en metro al trabajo, 1909

...ciento cincuenta años

Los restos de Lord Franklin. «La expedición dotada hace dos años para buscar a sir John Franklin en las regiones árticas ha regresado con noticias completas y fidedignas acerca del triste destino de Franklin y sus compañeros. El capitán Robert McClintock halló el registro y los restos de Franklin en Victory Point. Parece que murió en junio de 1847, hace unos 11 años. Todos sus compañeros perecieron también en aquellas inhóspitas y desoladas regiones. Confiamos en que se dé fin a las expediciones a esas pavorosas soledades de hielo y nieve. El capitán McClure descubrió un paso en el noroeste, pero, ¿de qué sirve? Para la navegación resulta totalmente impracticable; la conclusión es que las vidas y el dinero consumidos en las expediciones al Artico han sido un perfecto derroche.»

El poder de la prensa. «Sabemos por la historia antigua que varias naciones (egipcios, asirios, griegos y romanos) llevaron a cabo, en períodos sucesivos, grandes empresas y se convirtieron en grandes potencias. Durante su supremacía exhibieron una gran actividad intelectual y física, pero luego se tornaron indolentes y finalmente se degradaron; al dormirse en sus laureles, no tardaron en hundirse en la senilidad. Creemos que no deben albergarse temores a un final parecido en nuestra presente era de progreso. Ello lo evitará la prensa, el poderoso agente que mantiene en fermentación la mente pública e impide que se estanque.»

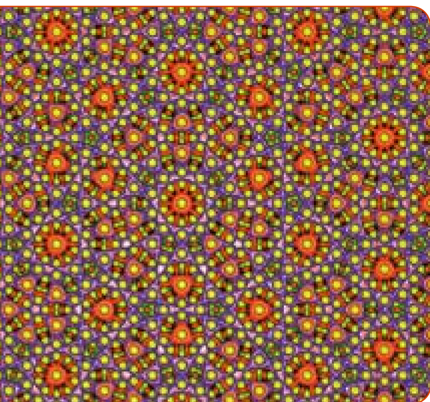
SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CI, N.º 18; 30 DE OCTUBRE DE 1909

¿Qué ha sido de ...?

Recopilación de Philip Yam

Cuasicristales naturales

Los cuasicristales, unos preparados de laboratorio obtenidos en 1984, son sustancias insólitas, a medio camino entre lo cristalino y lo amorfo. Exhiben estructuras ordenadas y simétricas, aunque aperiódicas, pues no están definidas por una célula unitaria (un cubo, por ejemplo) que se repita indefinidamente en tres direcciones [*véase* "Cuasicristales", INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre, 1996].



1. Una estructura cuasicristalina no puede reducirse a la repetición indefinida de una unidad básica.

Tras años de indagación, Paul Steinhardt, de la Universidad de Princeton, y sus colaboradores creen haber descubierto el primer cuasicristal natural. Examinaron con tal propósito sustancias químicamente similares a cuasicristales ya obtenidos en el laboratorio. La rebusca les condujo hasta la khatyrkita, un mineral existente —se dice— en los Montes Koryak, en Rusia. Se trata de una aleación de aluminio. Una muestra con khatyrkita, procedente de Italia, contenía también gránulos similares de una aleación semejante que cumple los criterios de cuasicristal.

Subsisten, no obstante, ciertas dudas sobre el origen de la khatyrkita, porque las aleaciones de aluminio no se forman fácilmente en procesos naturales. Steinhardt asegura que va a seguir estudiando los procesos que pudieron haber creado la muestra. "Como suele ocurrir en el caso de los minerales, resulta mucho más sencillo identificar y caracterizar el mineral que explicar su formación", comenta. El trabajo del equipo de Steinhardt apareció en *Science* del 5 de junio.

—*John Matson*

Memoria de muy larga duración

La conservación de información para las generaciones futuras ha suscitado cierta preocupación entre los archiveros digitales [*véase* "¿Son perdurables los documentos digitales?", INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo, 1995]. Por ejemplo, la duración de las tarjetas de memoria actuales, que almacenan entre 1,5 y 15 Gb por cm^2, se estima entre 10 y 30 años. Una solución al almacenamiento duradero podría llegar de un dispositivo experimental, basado en una nanopartícula de hierro que viaja entre dos contactos eléctricos por un nanotúbulo de carbono. Por aplicación de una tensión eléctrica, la partícula férrea puede ir o venir entre los contactos. El dispositivo, descrito en *Nano Letters* del 10 de junio, alberga 1,5 Tb por cm^2; los cálculos teóricos indican que el sistema se mantendría termodinámicamente estable durante mil millones de años. No parece necesario ampliar la garantía.

Sólo con proteínas

Para inducir en las células adultas el retorno al estado pluripotente era necesaria, al principio, la inserción de cuatro genes, uno de los cuales cancerígeno. Se ideó después una forma de crear estas células madre sin insertar el gen dañino. Ahora se ha logrado retrotraer al estado pluripotente células adultas de ratón utilizando sólo las proteínas codificadas por esos genes. Esta metodología, basada exclusivamente en proteínas, garantiza que el ADN foráneo no se integre de forma inesperada y modifique las células hospedadoras. Está expuesta en *Cell Stem Cell* del 8 de mayo.

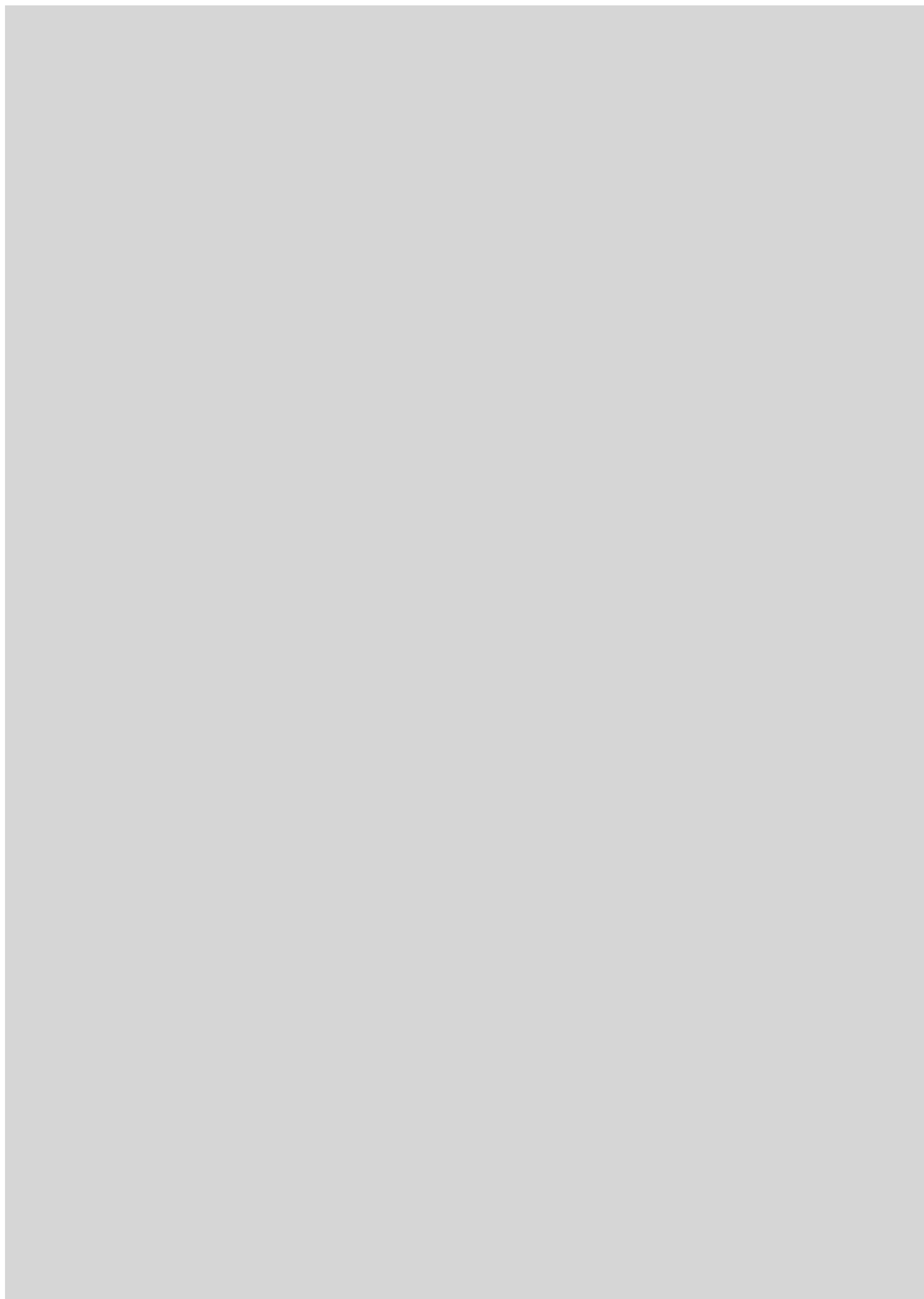
Exploración de Marte

En Marte, los resultados de los dos años de exploración del cráter Victoria por la sonda *Opportunity* están aportando datos sobre el pasado húmedo del planeta [*véase* "Agua en Marte", INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero, 2007]. La sonda ha descubierto en Victoria pequeñas esferas de hematites, una forma de óxido de hierro, que recuerdan a otras halladas a varios kilómetros de distancia. El descubrimiento lleva a pensar que las condiciones que dieron forma al terreno marciano operaron de forma regional, opinión que exponen los investigadores en *Science* del 22 de mayo. El próximo destino de *Opportunity* es el cráter Endeavour, a unos 14 kilómetros del Victoria. Entretanto, *Spirit*, el vehículo gemelo, quedó atrapado en mayo en suelos blandos y arenosos, al otro lado del planeta. *Spirit*, que tiene además una rueda rota, sigue atorado, sin que los científicos puedan idear la forma de ponerlo de nuevo en movimiento.



2. Un acantilado notable: Promontorio en el borde septentrional del cráter Victoria, fotografiado por la sonda *Opportunity* (*colores irreales*). En sus 12 metros de altura contiene pistas sobre el pasado húmedo de Marte.

ERIC HELLER *Photo Researchers, Inc.* (*cuasicristal*); CORTESIA DE STEVEN W. SQUYRES Y *SCIENCE*/AAAS (*Marte*)



ARQUEOLOGIA

Caza de caribúes en el lago Huron

El fondo del lago Huron pudo ser, en su día, un territorio de caza de los indígenas de esa zona. El territorio delimitado por las actuales Presque Isle, Michigan, y Point Clark, Ontario, fue tierra firme hace entre 7500 y 10.000 años. Con el sonar y vehículos teledirigidos, se han encontrado huellas de lo que parecen ser estructuras de piedra, puestos de caza, viviendas y caminos de caribúes bajo los moluscos y las algas del lago. Este descubrimiento corrige ideas anteriores, que suponían que la mayoría de los yacimientos arqueológicos se destruyen tras un período tan largo bajo el agua. Podrían, pues, descubrirse hábitats antiguos y artefactos enteros en el fondo del lago.

—*Katherine Harmon*





Erratum corrige

En el artículo "Salvar las neuronas nuevas", publicado en el número de mayo de 2009, en el recuadro de la página 30, donde dice "hipotálamo" debería decir "hipocampo".

FISICA

Vapor sin ebullición

La neblina que se ve por encima de un baño caliente y a la que se suele considerar "vapor" consiste, en realidad, en una serie de pequeñas gotas de agua líquida que se han formado a partir de la mezcla gaseosa de aire y vapor de agua que hay sobre la superficie del fluido. El vapor, que es un gas invisible, surge cuando las moléculas de agua, por la evaporación, escapan de un líquido. La evaporación es un proceso más lento que la ebullición, pero se acelera cuando el agua se va calentando (y adquiere así más energía).

Las condiciones en las que el vapor de agua se condensa y forma una neblina visible dependen de la temperatura ambiente y de la cantidad de vapor de agua en el aire. En comparación con el aire frío, el aire caliente puede contener mayor cantidad de vapor de agua antes de saturarse hasta producir la condensación. Esta propiedad explica por qué un baño caliente o una taza de té emiten más vapor visible en una fría mañana de invierno que en una cálida tarde de verano.

—*Herman Merte*
Universidad de Michigan en Ann Arbor



CAMBIO CLIMATICO

¿Descomponer el CO_2 en vez de secuestrarlo?

La descomposición del dióxido de carbono (CO_2) en carbono y oxígeno es factible, pero existe una dificultad: exige aportación de energía. Si tal energía procediera de hidrocarburos, que son los más importantes productores de gases "invernadero", la termodinámica nos dice que el resultado neto sería mayor abundancia de CO_2 que la inicial.

Consideremos la propuesta como una reacción química: CO_2 más energía produce carbono y oxígeno. En esencia, esta fórmula corresponde a la inversión de la combustión del carbón (carbono + oxígeno = CO_2 más energía). Si la energía procedente del carbón se aplicase a la reacción de descomposición, se liberaría más CO_2 del que se consumiría, porque ningún proceso tiene una eficiencia perfecta.

Otra opción consistiría en recurrir a una fuente de energía sin carbono para inducir una reacción que no solamente invirtiese el proceso de combustión, sino que utilizase además el dióxido de carbono como ingrediente para generar productos útiles, energéticamente ricos. En los Laboratorios Nacionales Sandia se está trabajando en la aplicación de luz solar concentrada para inducir descomposiciones térmicas a elevada temperatura, que producen monóxido de carbono, hidrógeno y oxígeno a partir de CO_2 y agua. El monóxido de carbono y el hidrógeno constituyen piezas químicas básicas, útiles en la producción de combustibles sintéticos. Llamamos a este proceso "de sol a petróleo".

—*James E. Miller*, ingeniero químico.
Laboratorios Nacionales Sandia

ZOOLOGIA

¿Por qué no se congelan los mamíferos marinos?

Los mamíferos marinos mantienen una temperatura interna elevada en aguas muy frías merced a reacciones conductuales y fisiológicas. Un comportamiento típico es la emigración. Al llegar el invierno, las ballenas francas preñadas emigran desde las aguas de Canadá y Nueva Inglaterra hacia las aguas costeras, más cálidas, de Georgia y Florida, para parir. Por su parte, las adaptaciones fisiológicas incluyen un gran tamaño corporal, como el de la mayoría de los mamíferos marinos, que supone una proporción bastante baja entre la superficie corporal y su volumen (ya que, a medida que aumenta el tamaño de un objeto tridimensional, su volumen aumenta más rápidamente que su superficie). Así pues, su superficie corporal, a través de la cual se produce el intercambio de calor con el entorno, es reducida en comparación con su gran volumen de tejidos corporales, que son los que generan calor. De esta forma, los grandes mamíferos pueden conservar el calor con eficacia mayor.



Los mamíferos marinos disponen también de excelentes aislantes en forma de cuero, grasa o ambos. La nutria marina tiene el pelo más denso de todos los mamíferos conocidos: 130.000 pelos por centímetro cuadrado, según un estudio. La piel aísla de forma más eficaz cuando está seca, porque atrapa el aire, un aislante excelente, en su interior. En cambio, el agua conduce mejor el calor y elimina el calor corporal veinticinco veces más deprisa que el aire a la misma temperatura. La piel de la nutria es tan densa, que puede atrapar una capa de aire incluso cuando el animal está sumergido.

Los mamíferos que pasan la totalidad o la mayor parte de su vida en el agua disponen de una capa de un tipo especial de grasa, más proteínas como el colágeno y la elastina. Consiguen así, entre otras cosas, aislarse del exterior y almacenar energía, de forma similar a los seres humanos. La cantidad de grasa varía de una especie a otra. Las crías de marsopa común son las que más grasa tienen: aproximadamente el 43 por ciento de su masa corporal es grasa.

En algunas circunstancias, los mamíferos marinos desnutridos o con mala salud podrían encontrar dificultades en mantener una cantidad saludable de grasa, tanto en términos de cantidad como de calidad. Podrían llegar a morir de frío, debido a las bajas temperaturas. Por otra parte, si se alejan de su hábitat natural, podrían sucumbir, expuestos a unas condiciones ambientales a las que no están adaptados.

La piel de los mamíferos marinos está repleta de células nerviosas sensibles a la temperatura, igual que la piel de cualquier otro mamífero. Estas criaturas tan especializadas gozan de la capacidad de percibir la temperatura y responden a los estímulos de calor o frío; ahora bien, resulta una cuestión espinosa traducir eso a lo que sienten si experimentan o no incomodidad.

—Ann Pabst
Universidad de Carolina del Norte en Wilmington

BIOLOGIA

Bacterias de la piel

La piel alberga muchas bacterias. Más de las que se venía admitiendo. Los investigadores del nuevo Proyecto Microbioma Humano, de los Institutos Nacionales de Salud, secuenciaron los genes de muestras de piel de voluntarios sanos y encontraron bacterias de 19 filos diferentes y de 205 géneros, con más de 112.000 secuencias genéticas. Los estudios anteriores de cultivos en la piel suponían que un solo tipo de bacteria, el *Staphylococcus*, era el residente principal. Se quiere establecer el nivel normal de presencia bacteriana para tratar así mejor las enfermedades de la piel, como el acné o los eccemas, que pueden implicar un desequilibrio en las poblaciones de bacterias.

—Katherine Harmon



PATRICK ENDRES *Getty Images (nutrias)*; BALLYSCANLON *Getty Images (mano en la espalda)*

FLUIDOS

Líquido que fluye hacia arriba

Un grupo de investigadores de la Universidad de Rochester ha ideado una forma de hacer que un líquido a temperatura ambiente fluya en contra de la gravedad. Grabaron con un láser muy intenso pequeños canales en una placa metálica. Mediante la evaporación y la capilaridad se consiguió que el metanol subiera por los canales a una velocidad sin precedentes, aun cuando la placa se colocara en posición vertical. Dicho trasporte pasivo de fluidos podría aprovecharse en dispositivos de microfluido, que dependen del movimiento de diminutas cantidades de líquido.

—John Matson

La silenciosa pandemia de las abejas

De cómo se descubrió la causa de una enfermedad silenciosa que ha causado el despoblamiento de millares de colmenas

Era el año 2004. El laboratorio de patología apícola del Centro Agrario de Marchamalo (Guadalajara) estaba colapsado por miles de cajas de cartón, llenas de abejas enfermas y moribundas, remitidas por apicultores de toda España. Las muestras esperaban su estudio para averiguar la causa de un extraño proceso, en el que las abejas desaparecían. Un cuadro clínico nuevo para apicultores y veterinarios, que estaba ocasionando grandes pérdidas económicas. A los ojos de ambos, las colmenas son animales de producción (como las vacas y las ovejas), puesto que generan productos para el consumo humano; asimismo, son benefactoras para los ecosistemas al polinizar plantas, silvestres y cultivadas.

A esa patología se la denominó en 2005 "desabejamiento de las colmenas", expresión sustituida luego por el actual "síndrome del despoblamiento de las colmenas" (SDC) en España y Europa, o "Colony Collapse Disorder" (CCD) en EE.UU. [*véase* "Salvar la abeja melífera", por Diana Cox-Foster y Dennis vanEngelsdorp; Investigación y Ciencia, junio de 2009]. Las abejas desaparecen y la colmena muere sin presentar una sintomatología que permita intuir el origen del problema.

Primavera sin abejas melíferas

En invierno es cuando se observan las mayores pérdidas. Ello coincide con el momento en que los apicultores se disponen a preparar su "ganado" para la recolección de primavera. El campo está henchido de néctar y polen, pero no hay suficientes abejas para trabajar. La desesperación del apicultor se exacerba cuando ve que sus colmenas no despiertan y que no se multiplica el número de abejas para recolectar. Aun cuando la abeja reina haya sobrevivido, ya no hay tiempo ni suficientes abejas trabajadoras para el momento de la floración. Se pierde la cosecha de ese año y la polinización debe ser asumida por otras especies. Las colmenas, que no consiguen reponer las abejas que mueren en el campo, se acaban despoblando y mueren.

En esta situación nos encontrábamos ya en 2000, cuando algunos apicultores y veterinarios consultaban al Centro Apícola por casos de debilitamiento o de elevada e inexplicable mortalidad de colmenares completos, en apariencia sanos. Como en toda ganadería, en la apicultura mueren cada año, por causas diversas, cierto número de animales o colmenas. Sin embargo, nada hacía pronosticar lo que ocurriría los años siguientes.

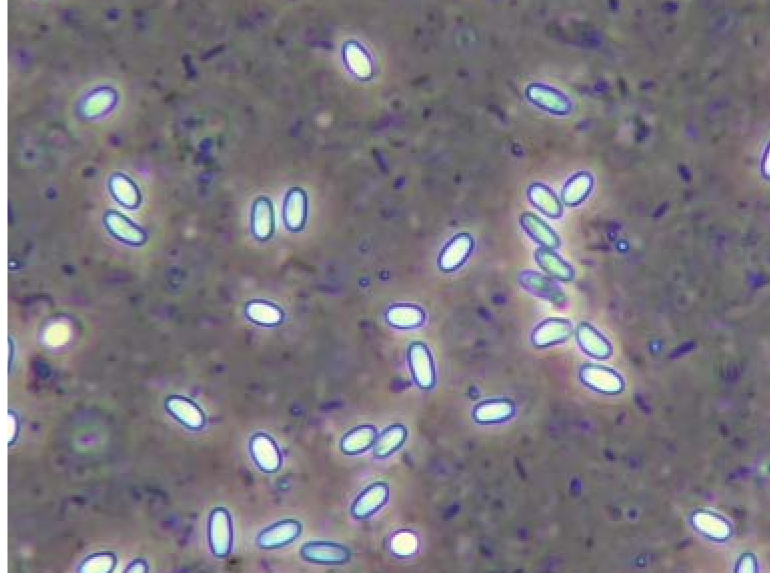
Iniciado el nuevo milenio, llegaban desde Francia noticias que responsabilizaban del desastre a los laboratorios que comercializaban insecticidas (fipronil e imidacloprida) para el tratamiento de semillas de maíz o girasol. Esta hipótesis ya se había descartado en España como causa principal de la pandemia, pues sólo uno de esos productos estaba permitido en nuestro país; se utilizó en el 8 por ciento de las semillas de girasol plantadas entre 2004 y 2009 en Cuenca, Córdoba y Sevilla. Análisis de esos compuestos (sobre todo neonicotinoides) en abejas pecoreadoras y polen de dichas zonas, realizados por el grupo de José Luis Bernal, de la Universidad de Valladolid, habían arrojado resultados negativos. Sin embargo, en Francia continuaban las batallas legales para encontrar un culpable químico de la pérdida de miles de colmenas.





1. Una colmena sana (*izquierda*) alberga millares de abejas. Pero si sufre el síndrome del despoblamiento (*derecha*), acaba perdiéndolas y muere.





2. Las abejas presentaban millones de esporas de *Nosema*, pero ni rastro de "diarrea" (signo clínico asociado a la infección por *N. apis*); la imagen muestra un intestino sano (*a*) y uno infectado (*b*) por *N. apis*. Las esporas resultaron ser de *N. ceranae*, otro parásito fúngico que también invade el intestino y causa la muerte de abejas adultas fuera de la colmena (*derecha*).

Nosema apis, el primer sospechoso

En España aumentaban las denuncias y continuaba la remisión de muestras. Presentaban un aspecto desconcertante: muchas esporas de *Nosema*, pero ni rastro de diarrea (síntoma patognomónico de la nosemosis debida a *N. apis*). Aquello no era normal. Con la colaboración de Amparo Martínez, de Tragsega, empresa dedicada a la sanidad ganadera y animal, se realizó un estudio epidemiológico de los miles de muestras enviadas a Marchamalo.

Los resultados confirmaron las observaciones iniciales. Las esporas de *Nosema apis* (parásito fúngico unicelular que invade el tracto intestinal y causa disentería apiar) parecían tener alguna relación —al menos estadística— con la desaparición de las abejas. Cuando en las muestras se observaban esporas de *Nosema,* se multiplicaba por seis la posibilidad de un despoblamiento de la colmena. Ahora bien, había hasta un 10 por ciento de las colmenas despobladas que no contenían esporas del parásito.

Era evidente que el diagnóstico de una enfermedad y la detección de un agente potencialmente patógeno no eran lo mismo. En ningún momento se habían observado signos de nosemosis, bien conocidos por veterinarios y apicultores: heces ("diarrea") de abejas en el interior de la colmena y abejas débiles que no pueden volar o con el abdomen dilatado por las heces, entre otros. En Francia, los expertos comenzaron a denominarla "nosemosis seca" por la ausencia de diarrea. Se sugirió una posible adaptación del agente o una mutación que causara un cuadro clínico nuevo, menos agudo y más crónico.

Nosema ceranae, el auténtico culpable

Los primeros intentos por conocer las características moleculares del parásito sospechoso resultaron infructuosos: las muestras no contenían ADN de *Nosema apis.* Tras un cambio metodológico, se resolvió el misterio. El material genético no correspondía a *N. apis*, ni a una cepa mutante con la capacidad patógena modificada. Se trataba de otro parásito muy semejante: *Nosema ceranae,* descrito sólo en la abeja asiática. Casi de forma simultánea, investigadores de Taiwán lo detectaron también en la abeja europea de su país.

Nos hallábamos ante un panorama inesperado: de los once apiarios incluidos en el estudio inicial, diez estaban infectados por un parásito transfronterizo. El fenómeno evocaba una situación semejante a la que se enfrentó nuestra apicultura en 1985, cuando entró en España uno de los principales patógenos de las abejas: el ácaro *Varroa*, procedente también del sudeste asiático. Desaparecieron el 40 por ciento de las colmenas. Casi veinte años después, otro parásito asiático estaba implicado en un proceso similar.

Comenzó así una carrera a contrarreloj: infecciones experimentales para comprobar que la detección de ADN se correspondía con un patógeno nuevo, seguimiento en campo de infecciones naturales para describir el curso de la enfermedad, demostración de los postulados de Koch sobre la capacidad de transmisión del agente entre hospedadores, estudio de posibles formas de contagio entre colmenares y de factores implicados en la patología observada, aplicación de nuevos métodos diagnósticos y seguimiento de la difusión de la enfermedad en España. Asimismo, se contactó con científicos de otros países que corroboraron nuestras observaciones y se desarrollaron estrategias para evitar las inmensas pérdidas que estaban sufriendo los apicultores. Todo ello con la colaboración de Pilar García Palencia, de la Universidad Complutense de Madrid, y la ayuda de Lourdes Prieto, experta en diagnóstico molecular de la Policía Científica.

El trabajo emprendido culminó en la demostración en colmenares profesionales de que *N. ceranae* era el único patógeno responsable de la muerte de decenas de colmenas. Empezó a detectarse en numerosos países. Ya no era sólo un parásito de abejas europeas criadas en Taiwán o en España. En cuanto se buscaba, aparecía, pero nadie se había percatado de la invasión silenciosa.

Un problema complejo

Los países que importan colmenas (Canadá, por ejemplo) y los que, además, desplazan grandes cantidades de ellas para polinizar su territorio (EE.UU.) denunciaban ya en el siglo pasado la presencia, en lugares muy distantes, de *N. ceranae*. Pero no lo relacionaban con el SDC. Pocos veterinarios participaron en esos estudios, que se centraron más en el insecto (abeja) que en el animal de producción (colmena). Es posible que la dualidad abeja-colmena haya dificultado la descripción del cuadro clínico de la enfer-

medad, pues no es lo mismo estudiar la patología que se observa en una colmena que la que se aprecia en una abeja.

Además, la colonia de abejas ha demostrado una gran capacidad de adaptación —verbigracia, aumento en la puesta de huevos de la reina— a la continua muerte de abejas, lo que ha encubierto el efecto patógeno de *N. ceranae*. Una vez debilitada la colonia, otros patógenos aprovechan la situación para atacar. Y, como ya detectamos en nuestro estudio estadístico inicial, amén de *Nosema* siguen coexistiendo otros factores debilitantes: ácaros *Varroa* (que vehiculan numerosos virus), insecticidas (la mayoría acaricidas aplicados frente a *Varroa)*, falta de polen y condiciones climáticas adversas.

Sabemos ahora que los millones de esporas detectadas en los estudios iniciales correspondían a *N. ceranae,* un parásito patógeno clínicamente insidioso, presente en todo el país, que no provoca diarrea, sino la muerte de abejas viejas. Se transmite entre colmenares. Presenta un período de incubación de más de un año, durante el cual la reina aumenta la puesta de huevos para compensar la pérdida de abejas. Mientras la reina es joven, se mantiene la población y la colonia de abejas parece sana (estado asintomático), pero cuando se agota, la colmena colapsa por falta de individuos jóvenes. El SDC se caracteriza, pues, por un largo período de incubación, durante el cual la infección pasa inadvertida; el despoblamiento se nota sólo cuando la muerte de la colmena es inminente.

Aránzazu Meana
Facultad de veterinaria
Universidad Complutense de Madrid

Raquel Martín Hernández
y **Mariano Higes**
Centro Agrario Marchamalo de la Junta
de Comunidades de Castilla-la Mancha

Pnicturos de hierro

Nuevos superconductores de alta temperatura crítica

El hallazgo a principios de 2008 de una nueva familia de superconductores basados en el compuesto de hierro LaOFeAs reaviva el debate sobre el mecanismo microscópico de la superconductividad de alta temperatura, que hasta este momento se había observado solamente en unos materiales cerámicos denominados cupratos. Un mecanismo todavía desconocido.

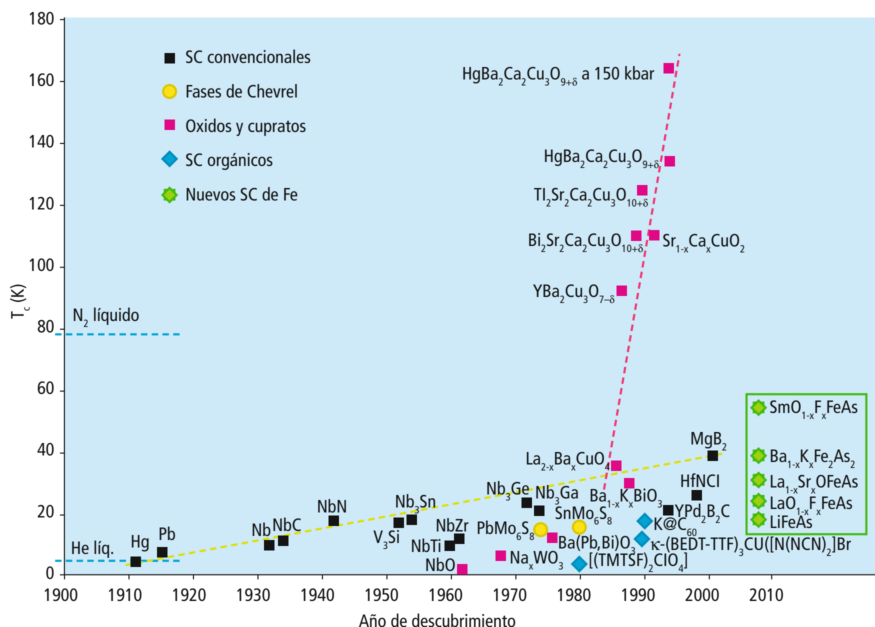
La clasificación de los materiales superconductores puede realizarse según diversos criterios. Uno de ellos concierne a su temperatura crítica (T_c), la temperatura por debajo de la cual aparece la fase superconductora; el criterio tiene que ver con que caiga o no por encima de unos 30 K. Un superconductor de alta temperatura crítica es aquel cuya T_c supera esa cota.

Según la primera teoría satisfactoria de la superconductividad, la teoría BCS enunciada en 1957 por John Bardeen, Leon Cooper y Robert Schrieffer, por encima de ese límite no debería ser posible la superconductividad (luego se ha visto que la teoría permite T_c mayores, al menos en unos grados).

Otro criterio de clasificación, pues, es el de si el mecanismo que origina la fase superconductora y las propiedades de ésta se pueden describir mediante la teoría BCS (o sus extensiones), en cuyo caso recibirá el apelativo de "convencional", o si se le escapa a esa teoría. Los cupratos de alta T_c y la nueva familia de compuestos de hierro no son convencionales.

Los superconductores convencionales son elementos puros o aleaciones que se comportan como metales en su estado normal (es decir, por encima de su T_c). A mediados de los años setenta aparecieron algunos superconductores con una estructura y comportamiento anómalos en comparación con los superconductores convencionales, aunque su fase superconductora se ajusta esencialmente al modelo BCS (por ejemplo, algunos óxidos y sulfuros de metales de transición).

Los superconductores con mayor aplicación práctica hoy en día son aleaciones



1. Evolución histórica del valor máximo de la temperatura crítica de superconductividad y de las familias más importantes de compuestos superconductores. Obsérvese la diferente pendiente de la evolución en los superconductores convencionales, los cupratos y los pnicturos. Todas estas sustancias presentan superconductividad a presión ambiente, excepto el compuesto $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{9+\delta}$, que lo hace a 150 kbar; aparece aquí porque se trata de un hito histórico.

del tipo NbTi y NbZr que, a pesar de su baja T_c (unos 10 K), presentan excelentes propiedades mecánicas y térmicas y una estabilidad estructural imprescindibles en muchas aplicaciones, aunque en algunas se utilizan las llamadas fases de Chevrel —compuestos de metal pesado, molibdeno y un calcógeno, el grupo del oxígeno en la tabla periódica— porque son enormes sus campos magnéticos críticos (la intensidad de un campo magnético aplicado al material a la que se destruye la superconductividad de éste).

Hacia mayores temperaturas críticas

La evolución de los materiales superconductores convencionales —casi todos aquellos que se descubrieron con anterioridad a 1986— fue lenta pero segura. A principios de los años ochenta, la posibilidad práctica de obtener materiales con una temperatura crítica superior a los 25-30 K se desvanecía debido a la limitación teórica que parecía imponer la teoría BCS. Los compuestos $Ba_{1-x}K_xBiO_3$ y MgB_2, descubiertos posteriormente, fueron las dos excepciones más destacables a esa cota, aunque sólo por unos pocos grados, entre los superconductores explicables por la teoría BCS. Sin embargo, la síntesis de nuevos materiales metaestables basados en óxidos dopados con una estructura laminar relacionada con la que muestran las perovskitas (titanato de calcio) produjo un cambio inesperado.

El descubrimiento en 1986 de los cupratos superconductores por Bednorz y Müller supuso una revolución en el campo de la superconductividad a todos los niveles. Enseguida, unos materiales cerámicos derivados del compuesto La_2CuO_4 dopado superaban la barrera de los 30 K; en efecto, $La_{2-x}Ba_xCuO_4$ tiene una T_c de 34 K, $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ de 38 K.

En cuestión de pocos meses, se sobrepasaba ampliamente la temperatura de ebullición del nitrógeno (N_2) líquido (77 K o –196 ºC). Primero fue el compuesto $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, con T_c de 90 K, después los cupratos con bismuto ($Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10-\delta}$, cuya T_c es 110 K) y de inmediato los cupratos con talio ($Tl_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10-\delta}$, con T_c de 125 K).

El número de nuevos cupratos con temperaturas críticas elevadas se incrementó rápidamente hasta 1993, momento en que aparece la familia del mercurio, donde un compuesto ostenta el récord de T_c a presión ambiente con 134 K y supera los 160 K a presiones elevadas. Sin embargo, a partir de 1995 se produjo un estancamiento en el ritmo de descubrimiento de nuevos materiales, exceptuando algunos hallazgos sobresalientes, como el MgB_2, el superconductor convencional de T_c más elevada que se conoce (38 K), o algunos superconductores exóticos. Por lo que se refiere a las aplicaciones prácticas, $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ es uno de los cupratos que más se utilizan, aunque algunas aplicaciones permiten el uso de compuestos de T_c más elevada.

La edad del hierro

A finales de 2007, una nueva familia de materiales inauguraba otra era en el campo de los superconductores: tras la edad del cobre (o, mejor dicho, de los cupratos), empieza la edad del hierro, en la

DOPAGE

El efecto del dopaje sobre una determinada estructura corresponde, dicho de forma simplificada, a la transferencia de electrones desde o hacia una subestructura que tenga una carga formal definida, transferencia inducida por la variación de la composición de otra subestructura, de naturaleza fuertemente iónica, mediante la substitución de iones por otros de diferente carga formal. (En los enlaces que mantienen unidas las moléculas, los átomos comparten electrones de manera que unas partes de la molécula "reciben" electrones —tienen una carga "formal" negativa— y otras los "ponen".) Para el caso de los pnicturos de hierro, en el sistema LaOFeAs sin dopar los planos [LaO] tienen una carga formal +1 por fórmula unidad (cada grupo LaO) mientras que los planos [FeAs] tienen carga formal –1. Diremos que el material está dopado con electrones si la variación de composición en los planos [LaO] inyecta electrones hacia los planos [FeAs], mientras que diremos que está dopado con huecos si la variación de composición arranca electrones de los planos [FeAs] (o, de forma equivalente, inyecta huecos en estos planos).

Para el material dopado con electrones $LaO_{1-x}F_xFeAs$, los planos $[LaO_{1-x}F_x]$ tienen una carga formal +(1+x), lo que induce un exceso de electrones en los planos [FeAs], que ahora tienen una carga formal de –(1+x) por fórmula unidad para mantener la electroneutralidad del sistema. En este caso, los planos FeAs han ganado una fracción de x electrones por unidad FeAs.

También se puede dopar con "huecos". Es el caso del dopaje del material LaOFeAs con Sr, que induce una transferencia de carga contraria: las unidades $[La_{1-x}Sr_xO]$ tienen una carga formal de +(1–x) y los planos [FeAs] ahora tienen una carga formal de –(1–x) para mantener la electroneutralidad del sistema, lo que equivale a una pérdida de x electrones (o de forma equivalente, una inyección de x huecos) por unidad FeAs. En el caso de los cupratos sucede algo parecido, teniendo en cuenta que para La_2CuO_4, por ejemplo, se tiene las unidades $[La_2O_2]$ con carga formal +2 y las unidades $[CuO_2]$ con carga formal –2.

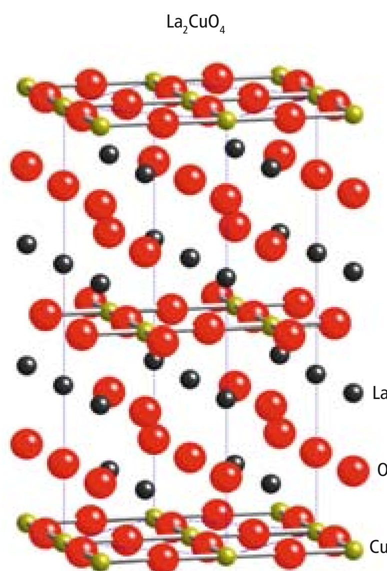
que los superconductores de alta T_c son compuestos que contienen Fe y no Cu. El origen de esta nueva era data de finales de 2006, cuando unos investigadores japoneses que estudiaban una familia de pnicturos (compuestos con P o As) de metales de transición descubren LaOFeP, un material superconductor a 5 K.

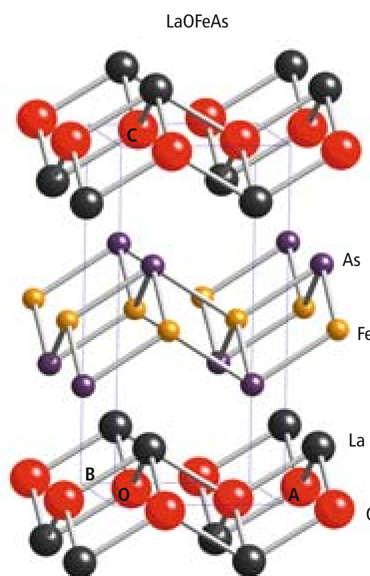
Sin embargo, la gran revolución todavía no había llegado. A principios de 2008, los mismos investigadores publicaron un artículo en *The Journal of the American Chemical Society* en el que se describía una fase superconductora en LaOFeAs dopado con electrones ($LaO_{1-x}F_xFeAs$) con una T_c de 28 K.

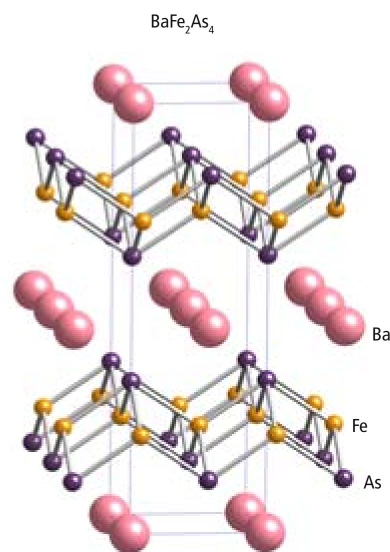
Semanas más tarde, otro grupo publicaba que se observaba superconductividad a T_c de 26 K para el mismo material, pero dopado con huecos ($La_{1-x}Sr_xFeAs$), es decir, de manera que falten electrones donde en la estructura sin dopar los hay; el diagrama de fases, que representa el comportamiento del material en lo tocante a la superconductividad en función de la temperatura y del nivel de dopaje, era similar al de los cupratos.

Inmediatamente después se publicaron varios trabajos sobre compuestos análogos con T_c cada vez más altas, hasta los 55 K de $SmO_{1-\delta}FeAs$, así como numerosos trabajos sobre estructuras afines, con elementos estructurales básicos (los planos FeAs de su estructura laminar) comunes, que presentaban temperaturas críticas superiores a los 25 K, por ejemplo el $BaFe_2As_2$. Por otro lado, se observan campos magnéticos críticos muy grandes para algunos materiales de este tipo, de más de 50 tesla en algunos casos, más de diez millones de veces la intensidad del campo magnético terrestre y del orden del mayor campo magnético duradero que se haya generado en un laboratorio.

No cabe duda de que el espectacular desarrollo de nuevos materiales de esta familia ha generado una enorme expectación en el mundo científico, ya que es de esperar que se alcancen valores ma-







2. Estructura cristalográfica de algunos compuestos tipo que, convenientemente dopados, presentan superconductividad de alta temperatura crítica. Se resaltan los enlaces entre átomos de Cu y O, o de Fe y As, para poner de manifiesto la existencia de los planos Cu-O o Fe-As en los cuales se dan las interacciones magnéticas dominantes.

yores de la T_c a medida que se conozcan los detalles estructurales y sintéticos de estos materiales. Por otro lado, el estudio de su estructura electrónica y sus propiedades arroja nueva luz sobre el mecanismo microscópico de la superconductividad, no sólo en esos sistemas, sino también en los cupratos.

El aspecto crucial: la estructura electrónica

Las propiedades de un sistema material se derivan de su estructura electrónica particular. La estructura electrónica y las propiedades de los materiales superconductores convencionales en su estado normal (es decir, el estado no suprconductor a temperaturas superiores a su T_c) vienen a ser los de un metal con más o menos impurezas o defectos; su descripción puede efectuarse de manera satisfactoria mediante las técnicas usuales de la teoría de bandas. Las energías cuánticamente permitidas de los electrones de los sólidos caen dentro de ciertos intervalos de energías continuos —las bandas— separados por intervalos de energías prohibidos.

Los resultados obtenidos contribuyeron a desarrollar la teoría BCS: un modelo dinámico, con los ingredientes esenciales de las interacciones entre electrones y distorsiones de la red (o interacciones electrón-fonón), creadoras de los pares de Cooper, los dúos de electrones emparejados que explican la superconductividad convencional. No existe, en cambio, una teoría completa de la superconductividad de alta temperatura crítica.

Los métodos que se mostraron eficaces para describir la estructura electrónica de metales y semiconductores, los de la teoría del funcional de la densidad (es decir, basados en la densidad de los electrones en vez de en la función de onda mecanocuántica conjunta de todos los electrones del material), en concreto las aproximaciones denominadas LDA y GGA, no describen correctamente, sin embargo, la estructura electrónica de los cupratos ni de muchos otros materiales magnéticos, entre ellos muchos óxidos de metales de transición.

Uno de los problemas con que tropieza la comprensión de la estructura electrónica de los cupratos superconductores fue precisamente la utilización de las aproximaciones LDA y GGA. Estas predecían un comportamiento metálico para los compuestos sin dopar, lo que se interpretó, incorrectamente, como un indicio de la existencia de una fase superconductora en el compuesto dopado.

Los experimentos mostraron que esa descripción era cualitativamente incorrecta: los compuestos sin dopar se comportaban como aislantes y, a bajas temperaturas, exhibían orden antiferromagnético (los momentos magnéticos, los imanes elementales, de sus átomos tienden a apuntar en sentido opuesto a los momentos magnéticos de los átomos vecinos). A pesar de esta prueba experimental, contrastada una y otra vez, una parte de la comunidad científica se empeñó en seguir aplicando esos métodos hasta fechas muy recientes.

La limitación de los métodos estándar (LDA y GGA) de cálculo de la estructura electrónica es uno de los temas de debate profundo hoy en día, ya que la descripción correcta de la estructura electrónica es esencial para poder establecer las interacciones que originan la superconductividad de alta temperatura crítica.

Semejanzas entre cupratos y pnicturos

En particular, predecir el carácter aislante y antiferromagnético de los cupratos sin dopar es esencial como punto de partida para la descripción de los sistemas dopados. Los trabajos de nuestro grupo inciden precisamente en este aspecto.

Para el cálculo de la estructura electrónica hemos recurrido tanto a aproximaciones a la función de onda de N electrones en un modelo reducido del sólido como a métodos que, aun basados en la teoría del funcional de la densidad, van mas allá de las aproximaciones estándar LDA y GGA. Así, hemos puesto de manifiesto la estrecha relación entre interacciones magnéticas y superconductividad en los cupratos, relación posteriormente respaldada por mediciones experimentales.

Al haber dos familias de superconductores de alta temperatura crítica, cupratos y pnicturos de Fe, una cuestión se suscita de inmediato: ¿existen paralelismos entre las estructuras electrónicas de ambos tipos de compuestos?

Por un lado, se sabe que el mecanismo microscópico de la superconductividad de los cupratos no se ajusta a la teoría BCS. Por otro, parece que la aparición de la superconductividad al introducirse en el material electrones o huecos en los planos de iones de Cu y O mediante dopaje adecuado guarda una estrecha vinculación con que estos sistemas adquieran un orden antiferromagnético a temperaturas suficientemente bajas. Fenómeno éste que, a su vez, tiene que ver con el carácter laminar de su estructura cristalina, constituida por planos de iones de Cu y O en los que se forma una red bidimensional de momentos magnéticos asociados a uno de los electrones desapareados de los iones Cu^{2+}; éstos se disponen en un entorno cristalino octaédrico o plano-cuadrado.

En los pnicturos de Fe, como en los cupratos, se observa un comportamiento antiferromagnético; los portadores de momento magnético son ahora los cationes Fe^{2+}, que en el entorno cristalino tetraédrico de planos Fe-As dan lugar a centros magnéticos caracterizados por tener el mismo valor de la magnitud cuántica que determina su magnetismo, el espín (en concreto, todos tienen un número cuántico de espín S igual a 2). Y de nuevo como en los cupratos, se origina así una red bidimensional de centros magnéticos acoplados antiferromagnéticamente. La superconductividad aparece cuando se introducen electrones o huecos en exceso mediante un dopaje adecuado que introduzca electrones o huecos en esta red magnética.

Estas semejanzas suscitan grandes esperanzas de poder esclarecer el mecanismo de la superconductividad de elevada temperatura crítica, pero chocan con las predicciones de los cálculos LDA y GGA de que los compuestos sin dopar exhiben un carácter metálico.

Los cálculos recientes de nuestro grupo, posibilitados con los superordenadores del Centro Nacional de Supercomputación en Barcelona, muestran que la estructura electrónica de cupratos y pnicturos es mucho más parecida de lo que se venía creyendo y confirman la estrecha relación entre superconductividad de alta temperatura crítica y las interacciones magnéticas entre electrones fuertemente localizados en los cationes metálicos.

Parece, pues, que un mismo y todavía desconocido mecanismo de la superconductividad de alta temperatura crítica sea común a ambas familias de compuestos.

Iberio de Pinho Ribeiro Moreira
y **Francesc Illas**
Departamento de Química Física e IQTCUB
Universidad de Barcelona

Iluminación cuántica

Una forma de que los beneficios cuánticos pervivan acabado el entrelazamiento

"Acción fantasmal a distancia": así describió Albert Einstein burlonamente el concepto de entrelazamiento cuántico, en el que los objetos pueden quedar vinculados unos a otros e influirse entre sí a pesar de la distancia. Ahora, parece que esta acción fantasmal podría operar aun cuando ya no existiera; sus efectos subsistirían cuando ha quedado ya roto el vínculo entre objetos.

En los experimentos sobre el entrelazamiento cuántico, el fundamento de la criptografía y la informática cuánticas, se utilizan pares de fotones. La medición de uno de los fotones entrelazados de un par afecta inmediatamente a su compañero, sin importar la distancia que medie, al menos teóricamente. La mayor distancia registrada hasta el momento es de 144 kilómetros, entre La Palma y Tenerife.

En la práctica, el entrelazamiento es un estado sumamente delicado. Las perturbaciones de fondo lo destruyen fácilmente, lo cual constituye una maldición para los ordenadores cuánticos en particular, porque los cálculos sólo se pueden realizar mientras dure el entrelazamiento. Sin embargo, Seth Lloyd, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, mantiene que un recuerdo del entrelazamiento puede sobrevivirle. Compara este efecto con la novela *Cumbres borrascosas*, de Emily Brontë: "la espectral Catherine se comunica con su Heathcliff cuántico como un destello de luz desde más allá de la tumba".

La idea llegó mientras Lloyd investigaba lo que sucede al utilizar los fotones entrelazados para la iluminación. Se podría pensar que esos fotones ayudarían a tomar mejores fotografías. Recuérdese que la fotografía con flash emite una luz y crea imágenes a partir de los fotones que se reflejan desde el objeto, pero los fotones errantes de otros objetos se confunden con las señales de retorno, dando lugar a fotografías borrosas. En cambio, si el flash emitiese fotones entrelazados, probablemente sería más fácil filtrar el ruido ambiente, comparando los fotones recibidos con la referencia de sus compañeros entrelazados.

Aun así, debido a la fragilidad del entrelazamiento, Lloyd no esperaba que la iluminación cuántica llegase a funcionar. Pero, rememora, "estaba desesperado" y deseoso de conseguir que un programa de sensores de la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada para la Defensa le concediese fondos para su idea de capturar imágenes en entornos ópticamente ruidosos. Para su sorpresa, cuando Lloyd calculó la posible eficacia de la iluminación cuántica, descubrió que no sólo funcionaba, sino que, "para conseguir todos los beneficios de la iluminación cuántica, había que destruir todos los entrelazamientos", explica.



En teoría, las imágenes fotográficas podrían ser mucho más nítidas si los flashes utilizasen fotones entrelazados.

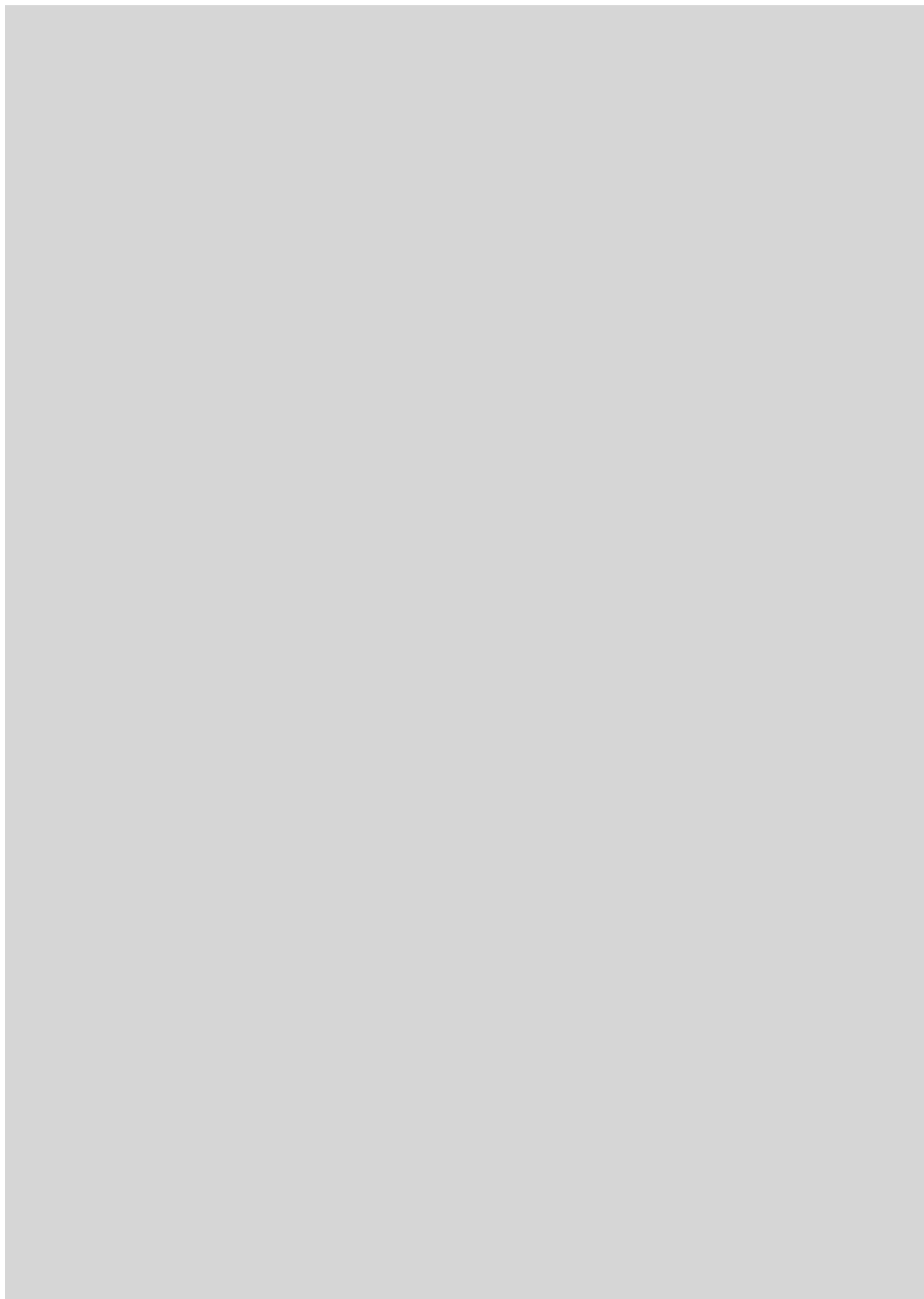
Lloyd admite que este hallazgo es desconcertante. No sólo a él se lo parece. Prem Kumar, físico cuántico de la Universidad del Noroeste, se mostraba escéptico con respecto a los beneficios de la iluminación cuántica hasta que vio los cálculos de Lloyd. "Todo el mundo intenta encontrar una explicación a esto. Plantea más preguntas que respuestas", señala Kumar. "Si el entrelazamiento no pervive, pero parece que es posible beneficiarse del mismo, quizás haya que discernir si el entrelazamiento realmente desempeña un papel en estas ventajas o si más bien existe algún otro factor que las explique".

Como posible explicación, Lloyd sugiere que, aunque el entrelazamiento entre los fotones pueda haberse perdido del todo, desde un punto de vista teórico, tras una medición, algunos restos del mismo podrían permanecer intactos. "Cabe imaginar los fotones como una mezcla de estados. Si bien la mayoría de esos estados ya no se hallan entrelazados, algunos siguen estándolo; esa pequeña parte de la mezcla es la responsable de que se produzca el efecto", señala.

Si la iluminación cuántica realmente funcionase, Lloyd sugiere que podría aumentar al menos un millón de veces la sensibilidad de los sistemas de radar y rayos X, además de la microscopía y las telecomunicaciones ópticas. Podría permitir el diseño de escáneres militares más difíciles de detectar, porque podrían trabajar con señales más débiles, escondiéndose así con más facilidad de sus adversarios. Lloyd y sus colegas elaboraron una propuesta para la realización práctica de la iluminación cuántica en un artículo presentado en el año 2008 a la revista *Physical Review Letters*, aprovechando el trabajo teórico recogido en el número del 12 de septiembre de *Science*.

La verdadera dificultad podría encontrarse en demostrar que el efecto se produce. Lo fácil es crear fotones entrelazados: basta con hacer que un rayo de luz atraviese un cristal, que actúa como divisor del haz en dos rayos de fotones de menor energía, separados pero vinculados. Un rayo ilumina el objeto y el otro sirve de referencia. El rayo reflejado y el de referencia se mezclan de nuevo (haciendo que pasen a través de un divisor invertido); los fotones que estaban entrelazados deberían de tener mayor facilidad para volver a combinarse o "reconvertirse". Sin embargo, cualquier experimento para demostrar que la iluminación cuántica puede mejorar la sensibilidad de la captación de imágenes tiene que utilizar señales débiles; y la creación de materiales que puedan reconvertir rayos luminosos débiles con alta eficiencia es técnicamente muy compleja, afirma Kumar. Aun así, Lloyd predice que habrá ensayos experimentales muy pronto.

Charles Q. Choi





La extinción de los neandertales

El hombre moderno y el neandertal coexistieron en Europa durante miles de años. ¿Por qué desaparecieron unos homínidos tan semejantes a nosotros? Parece que intervinieron diversos factores sutiles

Kate Wong

Hace unos 28.000 años, en lo que hoy es el territorio de Gibraltar, un grupo de neandertales luchaba por sobrevivir a lo largo de los acantilados de la costa mediterránea. Muy posiblemente, eran los últimos de su especie. En el resto de Europa y Asia occidental habían desaparecido miles de años antes, tras haber sido dominantes en la zona durante más de 200.000 años.

La península Ibérica, con un clima más suave y una gran variedad de animales y plantas, parece que fue su último bastión. Sin embargo, la población de Gibraltar no tardaría en desaparecer, dejando atrás sólo algunos útiles líticos y los restos carbonizados de sus hogueras.

Desde el descubrimiento del primer fósil neandertal en 1856, los paleontólogos han venido debatiendo sobre el lugar que ocupan en el árbol genealógico estos homínidos extintos y sobre las causas de su extinción. Durante decenios, dos teorías contrapuestas polarizaron el debate. Una defiende que los neandertales constituían una variante arcaica de nuestra especie, *Homo sapiens*, que evolucionó o fue asimilada por las poblaciones de *Homo sapiens* europeo. La otra teoría postula que los neandertales integraban una especie genuina, *Homo neanderthalensis*, y que los humanos actuales provocaron su desaparición al expandirse por territorio neandertal.

Sin embargo, dos descubrimientos clave realizados en el transcurso de los diez últimos años han llevado el centro del debate lejos de la cuestión sobre cuán pacíficas o violentas fueron las relaciones entre neandertales y *Homo sapiens*. El primer hallazgo resultó de los estudios de ADN, que no han aportado pruebas de hibridación entre los neandertales y los humanos modernos, según cabría esperar de la mezcla potencial de los dos grupos. El segundo procede de los estudios de datación, cada vez más precisos; indican que, tras la llegada de *Homo sapiens* a Europa hace 40.000 años, los neandertales no desaparecieron de forma brusca, sino que sobrevivieron durante más de 15.000 años. Ello contradice la hipótesis de una sustitución súbita, según la cual se habría producido un "ataque relámpago".

Los hallazgos reseñados han instado una investigación más rigurosa de otros factores que podrían haber conducido a la extinción de los neandertales. Lo descubierto induce a pensar que la respuesta quizá se encuentre en la compleja interacción de diversos factores.

KAZUHIKO SANO

CONCEPTOS BASICOS

- Los neandertales, nuestros parientes más próximos, dominaron Europa y Asia occidental durante más de 200.000 años. Pero se extinguieron hace unos 28.000 años.
- Se debate desde hace tiempo sobre la causa de su desaparición. Las últimas hipótesis se centran en el cambio climático y en las ligeras diferencias biológicas y de comportamiento que pudieron haber proporcionado alguna ventaja a los humanos modernos sobre los neandertales.

Hipótesis 1: El cambio climático sentenció a los neandertales

Hace alrededor de 55.000 años, el clima de Eurasia empezó a fluctuar de gélido a templado y a la inversa, en cuestión de decenios. Durante las olas de frío, en la mayor parte del territorio habitado por los neandertales, la cubierta de hielo se expandía y la tundra sustituía a los bosques. Esos cambios afectaron también a las presas potenciales. Con anterioridad, las fluctuaciones climáticas habían sido más espaciadas; las poblaciones de neandertales contaban con tiempo suficiente para recobrarse y adaptarse a las nuevas condiciones.

Esta vez, sin embargo, la celeridad de los cambios hizo imposible la recuperación. Hace unos 30.000 años, apenas sobrevivieron pequeños núcleos de poblaciones de neandertales aislados en la península Ibérica, que tenía un clima más suave y era rica en recursos. Esos grupos eran demasiado reducidos y dispersos para asegurar su supervivencia; acabaron desapareciendo. El mapa muestra las condiciones asociadas con el último máximo glacial, hace unos 20.000 años, que proporciona un escenario aproximado de las condiciones extremas a las que tuvieron que enfrentarse los neandertales durante el final de su dominio.



LAURIE GRACE; FUENTE MAPA: "RAPID ECOLOGICAL TURNOVER AND ITS IMPACT ON NEANDERTAL AND OTHER HUMAN POPULATIONS", POR CLIVE FINLAYSON Y JOSE S. CARRION, EN *TRENDS IN ECOLOGY AND EVOLUTION*, VOL. 22, N.º 4; 2007

Un mundo cambiante

Los estudios paleoclimáticos constituyen una de las líneas de investigación que están aportando más datos sobre la extinción de los neandertales. Se sabía, desde hace algún tiempo, que los neandertales habían experimentado a lo largo de su historia condiciones glaciales y condiciones más suaves, durante los períodos interglaciales. Sin embargo, en los últimos años, el análisis de los isótopos atrapados en el hielo, en sedimentos oceánicos y en polen recuperado en lugares muy distantes entre sí (Groenlandia, Venezuela e Italia) han permitido la reconstrucción detallada de los cambios climáticos que se produjeron durante el período correspondiente al estadio isotópico del oxígeno 3 (OIS-3, por sus siglas en inglés). El OIS-3 abarca desde hace unos 65.000 a 25.000 años; comenzó con unas condiciones climáticas moderadas y acabó con el norte de Europa cubierto por extensos mantos de hielo.

Considerando que los neandertales eran la única especie de homínido que vivía en Europa al principio del OIS-3 y que los *Homo sapiens* eran los únicos que quedaban allí al final de este período, los expertos se preguntan si fue el fuerte descenso de las temperaturas lo que condenó a los neandertales, quizá porque éstos no encontraron alimento suficiente o no pudieron mantener su calor. Pero esta hipótesis tiene un punto débil: los neandertales ya se habían enfrentado anteriormente a condiciones glaciales y habían sobrevivido.

De hecho, numerosas características de la biología neandertal y de su comportamiento revelan una adecuada adaptación al frío. Su tórax robusto, con forma de barril, y sus extremidades, más cortas, habrían favorecido la conservación del calor corporal; aunque hubieran necesitado también disponer de indumentaria de pieles de animales para evitar el enfriamiento. Además, su estructura muscular parece estar mejor adaptada a una forma de caza basada en la emboscada de mamíferos de gran tamaño y solitarios, como el rinoceronte lanudo, que pastaba por Europa del Norte y Central durante los períodos fríos. (Otras de las características distintivas de los neandertales, como la frente prominente, quizá resultaron de la evolución neutra de rasgos que se establecieron por deriva genética y no por selección.)

Pero los datos isotópicos están lejos de demostrar un cambio gradual de templado a frío. El clima se volvió muy inestable a medida que se acercaba al último máximo glacial, oscilando de forma amplia y brusca. Tales fluctuaciones vinieron acompañadas de cambios ecológicos profundos: los bosques dieron paso a terrenos desarbolados y los renos reemplazaron a ciertas especies de rinocerontes. Las oscilaciones fueron tan rápidas, que en el curso de la vida de un individuo, todas las plantas y animales que esa persona había conocido podían desaparecer y ser sustituidas por una nueva flora y fauna. Y entonces, con igual prontitud, el ambiente podía cambiar de nuevo y volver a su estado anterior.

Con otros expertos en ecología evolutiva, sostiene Clive Finlayson, del Museo de Gibraltar y director de las excavaciones en varios yacimientos de las cuevas del enclave, que esas condiciones ambientales en vaivén, y no necesariamente el frío, condujeron a los neandertales a un punto sin retorno. Esos cambios habrían exigido la adopción de una nueva forma de vida en un breve intervalo temporal. La sustitución de bosques por prados habría dejado a los cazadores habituados a la emboscada sin árboles donde ocultarse.

Para sobrevivir, los neandertales tuvieron que modificar sus métodos de caza.

Algunos neandertales se adaptaron a ese mundo inestable, como demuestran los cambios en sus útiles líticos y en sus presas. Pero muchos probablemente desaparecieron durante esas fluctuaciones, dejando tras de sí una población cada vez más fragmentada. En circunstancias normales, esos homínidos podrían haberse recuperado, tal y como habían hecho con anterioridad, cuando las fluctuaciones eran más escasas y espaciadas. Sin embargo, esta vez la rapidez de los cambios ambientales dejó poco tiempo para la recuperación. Andando el tiempo, las repetidas afrentas del clima redujeron las poblaciones de neandertales de tal forma, que ya no pudieron mantenerse, defiende Finlayson.

Los resultados de un estudio genético, publicado en abril en *PLoS One* por Virginie Fabre y sus colaboradores, de la Universidad del Mediterráneo en Marsella, apoyan la tesis de la fragmentación de las poblaciones neandertales. El análisis del ADN mitocondrial ha revelado que los neandertales podían dividirse en tres subgrupos (uno en Europa occidental, otro en Europa meridional y un tercero en Asia occidental); el tamaño de la población se redujo y fluctuó.

Especie invasora

Para otros investigadores, sin embargo, el hecho de que los neandertales no desaparecieran en Europa hasta la entrada de *Homo sapiens*, indica que el recién llegado tuvo alguna influencia en la extinción del lugareño, aun cuando no matara directamente a los neandertales. Probablemente, postulan los defensores de esta idea, los neandertales hubieron de competir con los nuevos humanos por los recursos y gradualmente fueron perdiendo terreno. Aunque, lo que dio a *Homo sapiens* esa ventaja sigue siendo cuestión debatida.

Una posibilidad es que los *Homo sapiens* fuesen más versátiles en su alimentación. Del estudio que sobre la composición química de los huesos de neandertales realizó Hervé Bocherens, de la Universidad de Tübingen, se desprende que al menos algunos de esos homínidos se especializaron en el consumo de mamíferos de gran talla, como los rinocerontes lanudos, bastante escasos. Los *Homo sapiens*, en cambio, consumían todo tipo de animales y plantas. Cuando se adentraron en territorio neandertal y empezaron a cazar grandes mamíferos, dejó a los pobladores en una situación de aprieto. Los *Homo sapiens* podían, por el contrario, complementar su dieta con animales de menor tamaño y alimentos vegetales.

VIKTOR DEAK



RESUCITANDO AL NEANDERTAL

A finales de este año, el equipo de Svante Pääbo, del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva en Leipzig, espera publicar el primer borrador del genoma neandertal. El trabajo ha dado lugar a especulaciones sobre la posibilidad de que algún día pudiéramos resucitar a esta especie extinta. Pero dicha hazaña, de ser técnicamente posible, provocaría toda una serie de dilemas éticos: ¿Qué derechos tendrían los neandertales? ¿Vivirían en un laboratorio, en un zoológico o en una casa?

Dejando a un lado las cuestiones morales, ¿qué pueden aprender los científicos de un neandertal resucitado? La respuesta es: menos de lo que podamos imaginar. Un neandertal que haya nacido y crecido en el ambiente actual no podría trasmitirnos los conocimientos de sus antepasados de la edad del hielo, no podría enseñarnos a construir un instrumento musteriense ni cazar un rinoceronte lanudo. De hecho, no podría explicar nada sobre la cultura de su especie. Sí sería posible, en cambio, estudiar la biología y las capacidades cognitivas de los neandertales para descubrir las diferencias entre esos homínidos arcaicos y nosotros que podrían habernos dado superioridad en la lucha por la supervivencia.

Curtis W. Marean, de la Universidad estatal de Arizona, afirma que los neandertales tenían su propia forma de hacer las cosas, que les resultaba apropiada mientras no tuvieran que competir con *Homo sapiens*. Los *Homo sapiens*, en cambio, que habían evolucionado en Africa bajo condiciones tropicales, lograron introducirse en ambientes completamente distintos y rápidamente desarrollar formas creativas de adaptarse a las nuevas circunstancias. Según Marean, la diferencia clave estriba en el retraso cognitivo de los neandertales, comparados con el estado avanzado de los *Homo sapiens*.

Marean no es el único que piensa que la inteligencia de los neandertales era limitada. Una opinión bastante extendida defiende que *Homo sapiens* superaba a los neandertales no sólo en técnicas líticas y tácticas de supervivencia, sino que contaban también con el habla, una herramienta que les pudo ayudar a establecer redes sociales más fuertes. Propone esta tesis que los neandertales no tenían ninguna posibilidad de competir con los recién llegados y ganarles.

Sin embargo, cada vez existen más datos que indican que los neandertales estaban mejor dotados de lo que se pensaba. De hecho, parece que practicaron muchos de los comportamientos que se atribuían en exclusividad a *Homo sapiens*. Para Christopher B. Stringer, del Museo de Historia Natural de Londres, la frontera entre neandertales y *Homo sapiens* se adelgaza por momentos.

Los yacimientos de Gibraltar han aportado pruebas que contribuyen a difuminar la línea que separaba ambos grupos de humanos. En septiembre de 2008, Stringer y sus colaboradores publicaron un estudio que demostraba que los neandertales de la cueva de Gorham y de la cueva de Vanguard, muy próxima a la anterior, cazaban delfines y focas, y recogían moluscos. En otro trabajo, todavía inédito, se demuestra que consumían aves y conejos. Los descubrimientos de Gibraltar, junto al de otros yacimientos, desmienten la hipótesis de que sólo los *Homo sapiens* tenían la capacidad de explotar los recursos marinos y capturar presas de talla pequeña.

Más datos que borran la línea entre las conductas neandertal y la de *Homo sapiens* proceden del yacimiento de Hohle Fels, en el sudoeste de Alemania. Bruce Hardy, del Kenyon College, comparó los útiles líticos realizados por los neandertales que habitaron esa cueva hace entre 36.000 y 40.000 años con los artefactos de los *Homo sapiens* que residieron allí hace entre 33.000 y 36.000 años, bajo un clima y condiciones ambientales semejantes. En abril, durante el congreso que la Sociedad de Paleoantropología estadounidense celebró

en Chicago, Hardy presentó los resultados de su análisis sobre las trazas de uso en los útiles y los residuos de sustancias con que habían estado en contacto. Su estudio demostraba que, aunque los *Homo sapiens* habían creado una mayor variedad de herramientas que los neandertales, los dos grupos de Hohle Fels las habían empleado para el mismo tipo de actividades.

Algunos de los usos refinados que se han documentado son el empleo de resinas de árboles para fijar puntas líticas a los mangos de madera, el uso de estas puntas a modo de armas a distancia como proyectiles y la elaboración de instrumentos de hueso y de madera. Sobre el motivo por el que los neandertales de Hohle Fels tuvieran un repertorio de instrumentos menos diverso que el de los humanos que habitaron allí, Hardy conjetura que aquéllos pudieron haber hecho el mismo trabajo sin ellas: “No necesitas una cuchara para pomelos para comer un pomelo”.

A la luz de los descubrimientos recientes, también la afirmación de que los neandertales carecían de lenguaje parece poco probable. Los investigadores saben que algunos adornaban su cuerpo con alhajas y probablemente pigmentos. En los estudios arqueológicos que tratan de reconstruir el comportamiento, esas manifestaciones de comportamiento simbólico se utilizan a menudo como indicio de la presencia de lenguaje. A mayor abundamiento, en 2007, un equipo liderado por Johannes Krause, del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva en Leipzig, publicó un estudio donde demostraba que portaban la misma versión de *FOXP2*, el gen que faculta para el lenguaje, característica de los humanos actuales.

Desempate

Ante el estrechamiento creciente del intervalo de separación entre las conductas neandertal y de *Homo sapiens*, se dirige ahora la atención hacia las pequeñas diferencias culturales y biológicas para explicar por qué los neandertales acabaron perdiendo. Según Katerina Harvati, del Instituto Max Planck, el empeoramiento y la inestabilidad de las condiciones climáticas habrían acentuado la competición entre los grupos humanos. En ese contexto, las pequeñas ventajas adquirirían suma importancia y quizá marcarían la diferencia entre la supervivencia y la muerte.

Stringer opina que la gama algo más amplia de adaptaciones culturales de *Homo sapiens* les proporcionó una mayor ventaja en tiempos difíciles. Las agujas que utilizaba *Homo sapiens* revelan que confeccionaban vestidos y tiendas para resguardarse del frío. Los neandertales, en cambio, no empleaban agujas —que se sepa—, por lo que se piensa que su indumentaria se elaboraba de una forma más tosca.

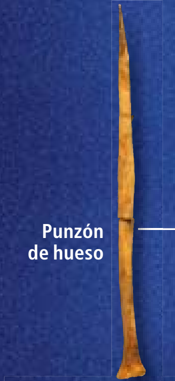
Las diferencias entre neandertales y *Homo sapiens* podrían también descubrirse en la división del trabajo. En un estudio publicado en *Current Anthropology*, Steven L. Kuhn y Mary C. Stiner, ambos de la Universidad de Arizona, exponen que la variedad en la dieta de los primeros *Homo sapiens* de Europa les habría permitido dividir el trabajo de forma que los hombres se ocupaban de la caza mayor y las mujeres recolectaban y preparaban los frutos secos, semillas y granos. Por el contrario, los neandertales estarían más especializados en la caza de grandes animales; ello significaría que mujeres y niños participaban en la caza: su función consistiría en ahuyentar a los ani-


Cuchillo

Hipótesis 2: Los neandertales fueron superados por *Homo sapiens*

Una teoría planteada hace largo tiempo sostiene que los neandertales se extinguieron porque sucumbieron ante la superioridad intelectual de los *Homo sapiens*. Sin embargo, cada vez hay más datos que indican que los neandertales utilizaron muchos de los comportamientos refinados que se habían atribuido exclusivamente a *Homo sapiens*. Los hallazgos revelan que al menos algunos neandertales estaban capacitados para un pensamiento simbólico (y, probablemente, para el lenguaje) y que tenían los instrumentos y el conocimiento para aprovechar una amplia gama de alimentos. No obstante, esos comportamientos estaban más arraigados en los *Homo sapiens*, lo que pudo haberles proporcionado alguna ventaja frente a los neandertales.


Colgante de diente


Punzón de hueso


Mandíbula de foca

COMPORTAMIENTO MODERNO EN LOS NEANDERTALES

RASGO	COMUN	OCASIONAL	AUSENTE	INCIERTO
Arte				✓
Uso de pigmentos	✓			
Adornos personales		✓		
Enterramientos rituales				✓
Intercambios de larga distancia				✓
Microlitos		✓		
Arpones			✓	
Instrumentos de hueso		✓		
Cuchillas		✓		
Agujas			✓	
Explotación de recursos marinos		✓		
Caza de aves		✓		
División del trabajo			✓	

CORTESIA DE CLIVE FINLAYSON *Museo Gibraltar (mandíbula)*; LABORATORIO DE ETNOLOGIA PREHISTORICA, LA VARENDE COLLECTION *(artefactos)*

EL ULTIMO BASTION de los neandertales pudo hallarse en unas cuevas de la costa de Gibraltar, donde los homínidos arcaicos vivieron hasta hace 28.000 años. Gibraltar y el resto de la península Ibérica gozaban de un clima templado y contaban con recursos abundantes, en comparación con la mayor parte de Europa durante las glaciaciones.





males hacia el sitio donde estarían apostados los hombres.

Al hacer que la fuente de alimentos fuera más fiable y el entorno para criar a los hijos más seguro, la división del trabajo favoreció la expansión de *Homo sapiens* a expensas de los neandertales.

Cualquiera que fuese la forma en que los neandertales obtenían su alimento, estos necesitaban grandes cantidades. Según Leslie Aiello, de la Fundación Wenner-Gren en Nueva York, los neandertales eran los "todoterreno" de los homínidos. Diversos estudios sobre tasas metabólicas han concluido que estos homínidos arcaicos requerían más calorías para sobrevivir que los *Homo sapiens*.

Karen Steudel-Numbers, de la Universidad de Wisconsin en Madison, ha calculado que el coste energético de la locomoción era un 32 por ciento mayor en los neandertales que en *Homo sapiens*, porque los primeros tenían un cuerpo más robusto y tibias más cortas que habrían reducido su zancada. Según Andrew W. Froehle, de la Universidad de California en San Diego, y Steven E. Churchill, de la Universidad de Duke, los neandertales necesitaban consumir diariamente entre 100 y 350 calorías más que los *Homo sapiens* que vivieran en las mismas condiciones. De esa forma, *Homo sapiens* pudo aventajar a los neandertales simplemente por el hecho de ser más eficiente en el consumo: si dedicaban menos energía a las funciones vitales, podían utilizar más energía para reproducirse y asegurar la supervivencia de su prole.

Existe otra diferencia entre neandertales y *Homo sapiens* que merece la atención, pues pudo ser la que dio a éstos superioridad en la supervivencia. La investigación llevada a cabo por Rachel Caspari, de la Universidad Central de Michigan, muestra que, hace unos 30.000 años, el número de individuos de *Homo sapiens* que vivieron durante tiempo suficiente para conocer a sus nietos se disparó.

No sabemos cuál fue el motivo de ese incremento de la longevidad en *Homo sapiens*, pero el cambio tuvo dos consecuencias clave. En primer lugar, las personas disponían de más años reproductivos, es decir, incrementaba su potencial de fertilidad. En segundo lugar, tenían más tiempo para adquirir conocimiento especializado y transmitirlo a las generaciones siguientes (dónde conseguir agua en épocas de sequía, por ejemplo). Para Stringer, una vida más larga da la posibilidad de generar redes sociales más extensas y mayores repositorios de conocimientos. Los neandertales, en cambio, tenían una vida más corta, por lo que sus conocimientos podían perderse con mayor facilidad.

Otras pistas sobre las causas de la extinción de los neandertales quizá provengan del análisis de su genoma, cuya secuenciación está previsto que termine este año. Sin embargo, las respuestas irán saliendo poco a poco a la luz, pues todavía no se conoce el significado funcional de muchas de las regiones del genoma en los humanos actuales, y por supuesto tampoco en los neandertales.

Stringer afirma que estamos muy lejos de poder interpretar el significado del genoma de un neandertal. Aun así, los futuros análisis pueden descubrir las diferencias cognitivas y metabólicas entre los dos grupos y arrojar luz sobre la hipótesis de un posible cruzamiento entre neandertales y *Homo sapiens*.

La investigación de la prehistoria está lejos de haber terminado. Pero los científicos están de acuerdo en lo siguiente: sin decantarse por si fue el clima o la lucha con *Homo sapiens*, o una combinación de ambos, la causa final de la extinción de los neandertales, los factores precisos que condujeron a la desaparición de las poblaciones de esos homínidos variaron de una a otra. En algunos casos la causa pudo ser la enfermedad; en otros, la endogamia. Cada valle tendría su propia historia.

En cuanto a los últimos neandertales, los que vivieron en las cuevas costeras de Gibraltar hace 28.000 años, no se pasaron la vida compitiendo con *Homo sapiens*, si seguimos a Finlayson, pues parece que éstos habitaron la región miles de años después de la desaparición de los neandertales. El resto de la historia está todavía por descubrir.

Bibliografía complementaria

OLDER AGE BECOMES COMMON LATE IN HUMAN EVOLUTION. Rachel Caspari y Sang-Hee Lee en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 101, n.º 30, págs. 10.895-10.900; 27 de julio, 2004.

RAPID ECOLOGICAL TURNOVER AND ITS IMPACT ON NEANDERTHAL AND OTHER HUMAN POPULATIONS. Clive Finlayson y José S. Carrión en *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 22, n.º 4, págs. 213-222; 2007.

HEADING NORTH: AN AFRICANIST PERSPECTIVE ON THE REPLACEMENT OF NEANDERTHALS BY MODERN HUMANS. Curtis W. Marean en *Rethinking the Human Revolution*. Dirigido por Paul Mellars et al. McDonald Institute for Archaeological Research, Cambridge, 2007.

NEANDERTHAL EXPLOITATION OF MARINE MAMMALS IN GIBRALTAR. C. B. Stringer et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 105, n.º 38, págs. 14.319-14.324; 23 de septiembre, 2008.

MUSEO DE HISTORIA NATURAL, LONDRES (*cuevas*); LAURIE GRACE (*mapa*)

Aventuras en el espaciotiempo curvo

La posibilidad de "nadar" y "planear" en un espacio curvo y vacío muestra que, pasados más de noventa años, la teoría de la relatividad general de Einstein sigue sorprendiendo

Eduardo Guéron

CONCEPTOS BASICOS

- En la teoría general de la relatividad de Albert Einstein, la gravedad surge de que el espaciotiempo se curva. Hoy, 90 años después de que Einstein desarrollara las ecuaciones de la teoría, los físicos siguen descubriendo en ellas nuevas sorpresas.
- Por ejemplo, en un espacio curvo un cuerpo puede, tal parece, desafiar la física básica y "nadar" por un vacío sin necesidad de empujar contra nada ni de ser empujado por nada.
- El espaciotiempo curvo permite una suerte de planeo gracias al cual un cuerpo puede frenar su caída incluso en el vacío.

En una famosa serie de historias escrita en los años cuarenta, el físico George Gamow relataba las aventuras de un tal señor C. G. H. Tompkins, humilde empleado de banca, que tenía vívidos sueños de mundos donde la vida cotidiana se topaba con extraños fenómenos físicos. En uno de estos mundos, la velocidad de la luz era de 15 kilómetros por hora; pedaleando, se ponían de manifiesto los singulares efectos de la teoría especial de la relatividad de Einstein.

No hace mucho, conocí, en sentido figurado, a un nieto del señor Tompkins, el señor E. M. Everard, filósofo e ingeniero que prolonga la tradición de su antepasado. Me contó una extraordinaria experiencia que había tenido. Guardaba relación con algunos aspectos recientemente descubiertos de la teoría de la relatividad general de Einstein. Voy a compartirlos con el lector mientras narro su sorprendente historia, plagada de espacios curvos, gatos que se contorsionan en el aire y astronautas en apuros que nadan como un perro a través del vacío; quizás hasta puede que estuviese por allí Isaac Newton, revolviéndose en su tumba.

Curvas peligrosas

En una lejana región del cosmos, el señor Everard había salido de su nave espacial para reparar una antena averiada. Observó que las hermosas luces de las estrellas lejanas parecían distorsionadas, como si las estuviera viendo a través de una gruesa lente. Sintió también que algo estiraba suavemente su cuerpo. Sospechando que sabía de qué se trataba, tomó un puntero láser y un tubo de crema de afeitar del equipo de supervivencia que llevaba en el cinturón, y encendió la mochila cohete para comprobar su hipótesis.

Con el rayo láser sirviendo de guía, avanzó en línea recta 100 metros, giró a la izquierda para avanzar varias docenas de metros en esa dirección y regresó al punto de partida; el triángulo que así recorría lo dibujaba mientras



con la crema de afeitar, como en las acrobacias aéreas con la estela de humo del avión. Luego, midió los ángulos de los vértices de su triángulo con un transportador y los sumó. El resultado fue de más de 180 grados.

Lejos de sorprenderse de esta aparente violación de las reglas de la geometría, el señor Everard recordó con afecto un travieso incidente no euclídeo de su infancia, cuando dibujó triángulos en el globo terráqueo del estudio de sus padres. Allí también sumaban los ángulos más de 180 grados. Llegó a la conclusión de que el espacio que le rodeaba debía de ser curvo como la superficie de aquel globo de hacía tanto y a tantos años luz de distancia. La curvatura explicaba, además, la distorsión de la luz de las estrellas y la sensación un poco desagradable de que le estiraban.

Así pues, el señor Everard comprendió que estaba experimentando los efectos de la relatividad general que se cuentan en los libros de texto. Experimentos bastante más refinados que su juego con la crema de afeitar los habían confirmado hacía mucho: la materia y la energía curvan el espacio y el tiempo, curvatura del espaciotiempo que hace que la materia y la energía (como su rayo láser y la luz de las estrellas) sigan trayectorias curvas. Sus pies y su cabeza "querían" seguir curvas ligeramente diferentes; la discrepancia producía la sensación de estiramiento.

Mientras pensaba en todo eso, el señor Everard apretó el botón para encender de nuevo la mochila cohete y volver a la nave espacial, pero no pasó nada. Alarmado, vio que el indicador de combustible marcaba cero, y eso estando a unos buenos (o más bien malos) 100 metros de la seguridad de su cabina. Peor aún: el triángulo de espuma y él mismo se estaban alejando de la nave a una velocidad constante.

Sin perder tiempo, arrojó el transportador, el láser y el tubo de espuma y cuanto llevaba

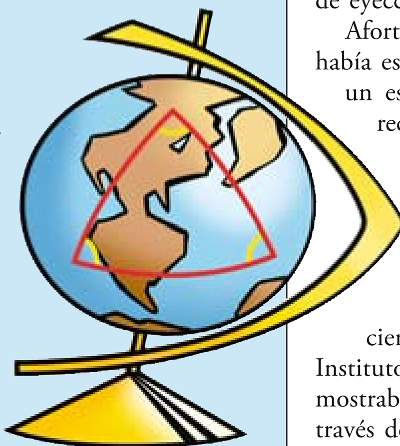
ESPACIOTIEMPO CURVO

Según la relatividad general, la gravedad surge de la curvatura del espaciotiempo. Pero, ¿qué significa para el espaciotiempo ser curvo y cuáles son algunas de las consecuencias?



ESPACIO PLANO

La geometría que se enseña en la escuela es euclídea, la geometría del espacio "plano". En un tal espacio, los ángulos de un triángulo suman 180 grados. Una superficie bidimensional plana, la superficie de una mesa de billar, es un espacio plano. Así es también, en una muy buena aproximación, el mundo tridimensional que nos rodea: si se "dibuja" un triángulo en el aire con tres rayos láser para marcar los lados, los ángulos sumarán 180 grados en cualquier lugar que se dibuje.



ESPACIO CURVO

La superficie de una esfera constituye un ejemplo de superficie bidimensional curvada. En una esfera, los ángulos de un triángulo suman más de 180 grados, característica propia de una región de curvatura positiva. Los lados del triángulo nos pueden parecer curvos a nosotros, en tres dimensiones, pero le resultarían perfectamente rectos a una hormiga que circulase por la esfera.



CURVATURA NEGATIVA

La superficie de una silla de montar tiene curvatura negativa: los ángulos de un triángulo suman menos de 180 grados.

LA GRAVEDAD SE DEBE A LA CURVATURA

Según la relatividad general, las concentraciones de masa y energía curvan a su alrededor el espaciotiempo. Esta curvatura hace que los objetos, es el caso de la Tierra en órbita alrededor del Sol, sigan trayectorias curvadas y caigan unos hacia los otros. En la mayoría de los casos, las trayectorias son muy similares a las predichas por la ley de la gravedad de Newton, calculada en un espaciotiempo plano. Se ilustra a menudo el concepto representando el espacio como si fuera una hoja elástica curvada (*abajo*), pero esta imagen es incompleta; en ella no figura cómo se deforma el tiempo a la vez que el espacio. Esta deformación hace que el tiempo pase ligeramente más despacio en lo más profundo del pozo gravitacional. Conocer cómo el tiempo se deforma es esencial para determinar las trayectorias correctas.



en el cinturón, en la dirección contraria a la de su nave espacial. De acuerdo con el principio de conservación del momento, con cada lanzamiento retrocedía un poco en la dirección opuesta, hacia la nave. Incluso se desprendió de la mochila cohete y lanzó ese peso muerto tan fuerte como pudo. Desgraciadamente, cuando ya no tenía nada más para lanzar, se encontró con que había hecho sólo lo suficiente para contrarrestar el movimiento inicial que le alejaba de la nave. Estaba ahora flotando inmóvil con respecto a la nave, aunque lejos de ella. La situación podía parecer desesperada: su profesor de física del bachillerato le había inculcado que no es posible acelerar un cuerpo sin una fuerza externa o alguna clase de eyección de masa.

Afortunadamente, nuestro amigo a la deriva había establecido antes que se encontraba en un espacio curvo. Sabía lo bastante para recordar que algunas leyes de conservación de la física operan en un espacio curvo de una forma diferente de su modo de actuar en el espacio plano newtoniano (sin curvatura). En particular, recordó la lectura de un trabajo del 2003 en el que un científico planetario, Jack Wisdom, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, demostraba que un astronauta podría moverse a través de un espacio curvado de una manera que resultaba imposible según las leyes del movimiento de Newton: moviendo brazos y piernas de forma adecuada. En otras palabras: podía nadar. No se requería ningún fluido contra el que empujar; nadaría en el vacío como un perro en el agua.

El truco de Wisdom se parece bastante al modo en que un gato soltado panza arriba gira el cuerpo y contrae y extiende las patas para darse la vuelta y caer sobre ellas. Las leyes de la mecánica newtoniana permiten que el gato cambie de orientación sin necesidad de empujar algo o de ser empujado por nada; en cambio, impiden que modifique su velocidad.

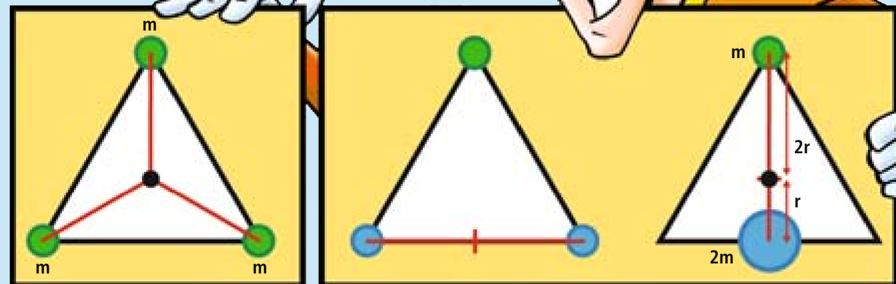
Los astronautas, por ejemplo los que están a bordo de la Estación Espacial Internacional, aplican una versión del truco de la torsión del gato para girar en la ingravidez, sin necesidad de agarrarse a un asidero. En el espacio curvo de la relatividad general, un gato o un astronauta pueden realizar las acrobacias más impresionantes. Nuestro héroe retrocedió hasta su nave espacial en algo más de una hora; aunque no ba-

¿POR QUE LA CURVATURA PERMITE MOVIMIENTOS INUSUALES?

En el espacio plano, un sistema aislado en reposo no puede mover su centro de masas, pero el espacio curvo tiene un resquicio para eludir esa restricción.

EL CENTRO DE MASAS ESTA BIEN DEFINIDO EN UN ESPACIO PLANO

Tres bolas de igual masa, *m*, en los vértices de un triángulo equilátero tienen su centro de masas en el centro geométrico del triángulo (*punto negro*). Esta posición se puede calcular como el punto que es equidistante de las tres esquinas (*izquierda*), pero también se puede calcular en dos etapas (*derecha*).



EL CENTRO DE MASAS ESTA MAL DEFINIDO EN UN ESPACIO CURVO

Ahora imaginemos que las tres bolas se encuentran en un espacio curvo, el de la superficie de una esfera por ejemplo, y se encuentran colocadas en lugares correspondientes a Dakar, Singapur y Tahití en la Tierra. Calcular el centro de masas de las bolas mediante la búsqueda de un punto equidistante da un punto cerca del Polo Norte (*izquierda*). Calcular el centro de masas en dos etapas, sin embargo, da un punto cerca del ecuador (*derecha*). Esta ambigüedad acerca del centro de masas hace que sea posible "nadar" a través de un espacio curvo.



tió un récord olímpico, esa velocidad bastó y sobró para que sobreviviese y emprendiera más aventuras.

Lecciones de natación

¿Cómo funciona exactamente el fenómeno de Wisdom? ¿Cómo pudo el señor Everard nadar en el espacio? En un espacio plano, del tipo supuesto por la mecánica newtoniana, y también por la relatividad especial, el centro de masas de un sistema aislado (por ejemplo, el astronauta más la mochila) nunca se acelera. Supongamos que el señor Everard hubiera atado una larga cuerda a su mochila antes de lanzarla y que, a continuación, la recuperara de nuevo. Durante el ejercicio, como la mochila y el astronauta primero se alejarían y luego se reunirían de nuevo, el centro de masas habría permanecido inmóvil. Al final, el astronauta y la mochila volverían a la posición inicial. Más en general, Everard no podría moverse modificando cíclicamente su forma o estructura y, a continuación, recuperándola de nuevo.

En el espacio curvo, la situación cambia. Para entender por qué, imagínese una criatura con dos brazos y una cola que se pueden extender y retraer (*véase el recuadro* "Natación en la esfera"). Para simplificar la discusión, imagínese que prácticamente toda la masa del alienígena se concentra en los extremos de sus tres partes, una cuarta parte de la misma en cada brazo y la otra mitad en la punta de la cola. Si flota en el espacio *plano*, este alienígena no podrá ni avanzar ni retroceder. Si extiende la cola, digamos, dos metros, las manos avanzarán un metro y la punta de la cola retrocederá un metro: el centro de masas no se moverá. La retracción de la cola colocará de nuevo al alienígena entero en su posición de partida, igual que el señor Everard y su inerte mochila. Una cosa parecida sucederá, si intenta extender los brazos. Sea cual sea la combinación o secuencia de extensiones y retracciones de las extremidades que lleve a cabo, su centro de masas seguirá igual. Lo máximo que podrá hacer es el truco del gato (extender las extremidades, girarlas, retraerlas y girarlas de nuevo) para cambiar la dirección en que esté apuntando.

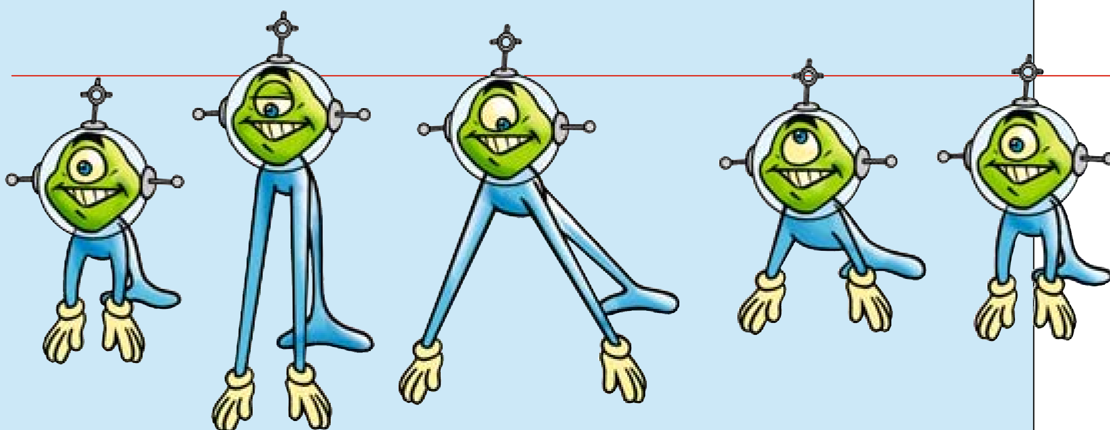
Pero ahora imaginemos que este alienígena vive en un espacio curvo, con una forma como la superficie de una esfera. Para ayudar a imaginarlo, me valdré de términos geográficos para describir las posiciones y direcciones

El autor

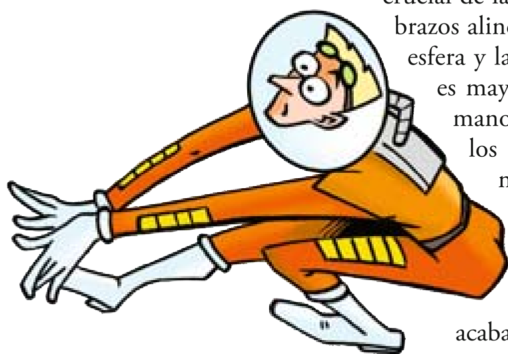
Eduardo Guéron es profesor asociado de matemáticas aplicadas en la Universidad Federal de ABC, en Brasil (la "Región ABC" limita con la ciudad de São Paulo). Guéron obtuvo su doctorado en la Universidad estatal de Campinas, en Brasil, en 2001, y fue científico visitante en el Instituto de Tecnología de Massachusetts de 2003 a 2004. Estudia la gravitación, los sistemas dinámicos y problemas fundamentales en física general.

NADADOR EN UN ESPACIOTIEMPO CURVO

Una máquina o una criatura alienígena con forma de trípode podría nadar a través de espaciotiempos vacíos pero curvos al extender, abrir, retraer y cerrar las piernas cíclicamente. Cada ciclo de cuatro acciones mueve el trípode a través del espacio —aquí una pequeña distancia hacia la parte superior de la página—, a pesar de que no expulsa ninguna sustancia propulsora y de que ninguna fuerza externa actúa sobre él.



sobre la esfera. El alienígena parte del ecuador de la esfera, con la cabeza apuntando hacia el oeste y brazos y cola contraídos. Extiende ambos brazos, uno hacia el norte y otro hacia el sur. A continuación, alarga la cola mientras mantiene los brazos extendidos perpendiculares al cuerpo. Al igual que en el espacio plano, si la punta pesada de la cola se mueve un metro hacia el este, las manos se moverán un metro al oeste. Aquí está la diferencia crucial de la esfera: el alienígena mantiene los brazos alineados con líneas de longitud de la esfera y la distancia entre ese tipo de líneas es mayor en el ecuador. Así, cuando las manos del extraterrestre (más cerca de los polos norte y sur de la esfera) se mueven un metro hacia el oeste, sus hombros (en el ecuador) se mueven más de un metro. Ahora, cuando contrae los brazos a lo largo de las líneas de longitud, acaba con las manos desplazadas más de un metro hacia el oeste. Cuando retrae la cola y recupera la configuración original del cuerpo, ¡se encontrará a una pequeña distancia hacia el oeste, a lo largo del ecuador, de su posición original!



El espaciotiempo está sólo muy ligeramente curvado, excepto cerca de un agujero negro. Por lo tanto, en la práctica, una persona tendría que nadar miles de millones de años antes de trasladarse un milímetro.

Repitiendo cíclicamente esos movimientos, el alienígena avanza a lo largo del ecuador. La punta de la cola y manos, insólitamente pesadas, no son esenciales para la natación, pero resulta más fácil ver en qué medida los brazos se mueven en respuesta a la contracción de la cola, si toda la masa se concentra en esos tres puntos. Si las especies alienígenas dependieran de la natación en el espacio curvo para su supervivencia, no sería tan raro que evolucionaran de modo que tuviesen pesadas masas en las extremidades, porque así mejorarían la eficiencia de su natación. Al fin y al cabo, la masa situada en los codos no llegaría tan lejos en la curvatura de la esfera como las manos y, por lo tanto, no produciría tanto desplazamiento adicional del cuerpo.

Una esfera es una superficie bidimensional, pero el mismo principio funciona en el espaciotiempo cuadridimensional curvo: también en él, los cambios cíclicos en la configuración de un sistema pueden dar lugar a un desplazamiento neto. El nadador propuesto por Wisdom era un trípode de patas telescópicas. Las piernas podían retraerse o extenderse en longitud; el ángulo entre ellas, abrirse o cerrarse. El trípode nadaba extendiendo las patas, abriéndolas, contrayéndolas y cerrándolas. Cuanto mayor sea la curvatura del espaciotiempo del trípode, más lejos se desplazará mediante esa secuencia de movimientos.

¿Violación de las leyes del movimiento?

Aunque resulte sorprendente en un primer momento, la natación es una consecuencia directa de las leyes básicas de conservación, no una violación de las mismas. La natación funciona porque el propio concepto de centro de masas no está bien definido en un espacio curvo.

Supongamos que tenemos tres bolas de un kilogramo situadas en los vértices de un triángulo equilátero. En una superficie plana, su centro de masas es el centro geométrico del triángulo. Hay varias maneras de calcular dónde se encuentra el centro de masas; todos los métodos conducen al mismo resultado. Se puede encontrar el punto que está a igual distancia de las tres bolas. O bien, se pueden reemplazar dos de las bolas con una sola bola de dos kilogramos situada a medio camino entre ellas y, a continuación, calcular el centro de masas de dicha bola y la tercera bola (el punto que está a un tercio del camino según la

línea que va a la tercera bola). El resultado será el mismo. Este hecho geométrico repercute en la dinámica del sistema: el centro de masas de un sistema aislado nunca se acelera.

Sobre una superficie curva, sin embargo, los cálculos de métodos diferentes pueden no dar el mismo resultado. Consideremos un triángulo formado por tres bolas de igual masa situadas en Singapur, Dakar y Tahití, en la vecindad del ecuador las tres. Un punto equidistante a las tres bolas se hallaría cerca del Polo Norte. Sin embargo, si se sustituyen las bolas de Singapur y Dakar por otra más pesada situada entre ellas y, a continuación, se calcula la posición que está a un tercio del camino a lo largo del círculo máximo que une esa bola y la de Tahití, la respuesta caerá cerca del ecuador. Por lo tanto, el "centro de masas" sobre una superficie curva es ambiguo. Merced a ese fenómeno geométrico, un sistema podrá moverse en un espacio curvo aun cuando esté aislado de cualquier influencia externa.

No acaban ahí las sutilezas. Un ejercicio común en los cursos de física consiste en sumar las fuerzas que actúan sobre un cuerpo para determinar la fuerza resultante. Las fuerzas se expresan en notación vectorial, con flechas (o negritas). Para sumar dos vectores, se deslizan las flechas de manera que la base de una flecha coincida con la punta de la otra. En un espacio curvo, este procedimiento tiene problemas: la dirección de un vector puede cambiar cuando se desliza por una trayectoria cerrada. El procedimiento para calcular la fuerza total sobre un cuerpo en un espacio curvo es, por lo tanto, considerablemente más complicado y puede dar lugar a rarezas tales como la natación en el espaciotiempo.

Algunos efectos de la gravitación de Newton pueden parecer, a primera vista, similares a nadar en el vacío. Por ejemplo, un astronauta en órbita alrededor de la Tierra podría alterar su órbita al extenderse y ovillarse en diferentes etapas. Pero estos efectos newtonianos son distintos de la natación en el espaciotiempo, ya que se producen debido a que el campo gravitatorio varía de un lugar a otro. El astronauta no puede cambiar su órbita newtoniana con sólo repetir rápidamente movimientos muy pequeños; sí puede nadar de ese modo a través del espaciotiempo curvo.

Que la posibilidad de la natación en el espaciotiempo pasara inadvertida durante casi 90 años nos recuerda cuánto queda por aprender de las teorías de Einstein. A pesar de que es poco probable que construyamos un cohete nadador a corto plazo, el premio Nobel de física Frank Wilczek, también del MIT, ha sostenido que el trabajo de Wisdom abre in-

NATACION EN LA ESFERA

La natación a través de espaciotiempos curvos puede entenderse mejor con el ejemplo de un nadador alienígena bidimensional más simple, que vive en la superficie de una esfera.

PREPARADO PARA EMPEZAR A NADAR

El nadador encara el oeste con los brazos apuntando al norte y al sur y la cola al este. Para simplificar la discusión, imaginemos que toda la masa del nadador está concentrada en el final de sus extremidades, un cuarto en las manos y la mitad en la punta de la cola.



BRAZOS FUERA

Los brazos se extienden al norte y al sur (las bolas de color naranja marcan dónde estaban las manos al principio). Los movimientos iguales y opuestos mantienen el momento equilibrado.



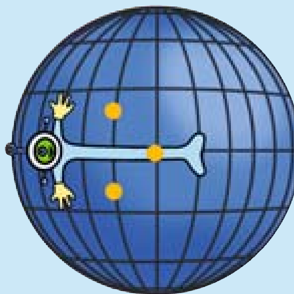
ESTIRAR LA COLA

Ahora la cola se extiende hacia el este. Para equilibrar el momento, las manos se mueven hacia el oeste. Al estar cerca de los polos de la esfera, las manos cruzan varias líneas de longitud, mientras recorren la misma distancia que la pesada punta de la cola; los "hombros" se mueven un extenso camino hacia el oeste a lo largo del ecuador.



BRAZOS DENTRO

Los brazos se retraen a lo largo de las líneas de longitud (que son en la esfera el equivalente de una recta). Las manos se hallan ahora mucho más lejos, hacia el oeste, de sus puntos de partida; mucho más de lo que lo está la punta de la cola, hacia el este, del suyo.



RETRAER LA COLA

Cuando la cola se retrae de nuevo, las manos se mueven hacia atrás, hacia el este, para equilibrar el momento. El ciclo de acciones ha movido al nadador en su conjunto una corta distancia hacia el oeste, debido a la distancia "extra" en que se han movido las manos.



En una forma de silla de montar, que tiene curvatura negativa, las mismas acciones moverían al nadador hacia el este. Consúltese http://physics.technion.ac.il/~avron para ver animaciones de los dos ejemplos.

“No puedes levantarte a ti mismo tirando de tus botas, pero sí con la ayuda de tus pies.”
—Jack Wisdom, MIT



terrogantes profundos sobre la naturaleza del espacio y del tiempo.

En particular, los hallazgos de Wisdom nos llevan a la vieja cuestión de si el espacio es un objeto material por derecho propio (una posición conocida como sustancialismo) o un mero dispositivo conceptual conveniente para expresar las relaciones entre los cuerpos (una posición conocida como relacionalismo) [*véase* “Filosofía del tiempo” por George Musser; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 2002].

Para ilustrar estos puntos de vista, imaginemos que el señor Everard está flotando en un universo vacío. No tiene estrellas o galaxias que le sirvan de puntos de referencia para juzgar su movimiento. Ernst Mach, un relacionalista, argumentó en 1893 que el movimiento no tendría sentido en esa situación. Sin embargo, incluso un espacio completamente vacío puede ser curvo, en cuyo caso el señor Everard podría nadar en él. Por lo tanto, parece que el espaciotiempo actúa como un fluido virtual con respecto al cual puede definirse el movimiento de un cuerpo aislado.

Incluso el espacio completamente vacío tiene una estructura geométrica determinada, otro punto a favor del sustancialismo. Al mismo tiempo, sin embargo, la materia (o cualquier otra forma de energía) es lo que da al espaciotiempo su estructura geométrica, de manera que el espaciotiempo no es independiente de su contenido, un punto a favor del relacionalismo. Este debate, que irrumpe en los intentos de desarrollar una teoría unificada de la física, sigue sin resolverse.

En las alas del tiempo

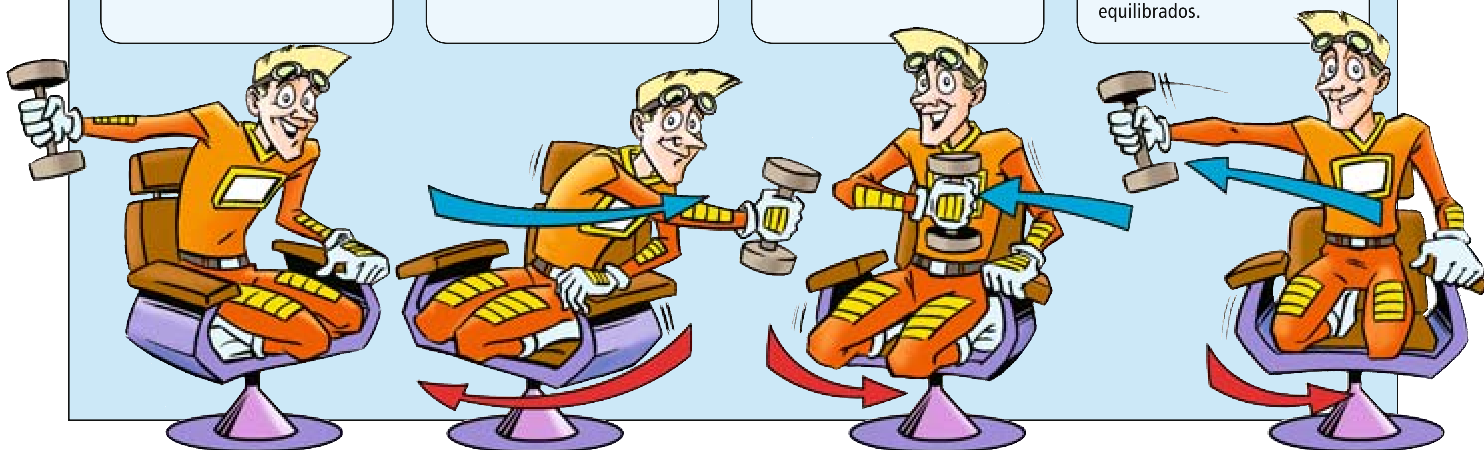
Agotado por el esfuerzo de nadar de vuelta a su nave espacial, el señor Everard descansaba en el interior de la cabina mientras el piloto automático planeaba un itinerario para regresar a casa. De repente, la alarma se accionó y las luces rojas empezaron a parpadear: la nave espacial estaba cayendo hacia un planeta gigante. A Everard le encantó esta oportunidad de nuevos e interesantes descubrimientos, pero el aterrizaje en el planeta no iba a ser fácil. La nave carecía de suficiente combustible para un descenso controlado por el motor y en el planeta, privado de atmósfera, el paracaídas resultaba inútil.

Afortunadamente, recordó el trabajo del 2007 que escribimos el físico matemático Ricardo A. Mosna, de la Universidad estatal de Campinas, y yo. Inspirados por el ejemplo de Wisdom, dimos con otra manera de explotar la relatividad general para controlar el movimiento. Nuestro análisis indicaba que un objeto puede frenar su descenso hacia un planeta al estirarse y contraerse repetidamente de manera asimétrica (en el sentido de que el movimiento de extensión sea más rápido que el de retracción). Una nave equipada con un dis-

PARECE UN GIRO

En la vecindad de la Tierra, el espaciotiempo se halla tan cerca de ser plano, que no se puede “nadar” a su través para cambiar de ubicación. Sin embargo, se puede cambiar la orientación sin necesidad de una fuerza externa (de manera muy parecida a como un gato que cae se gira para caer sobre sus pies). Esta es una manera de probarlo:

1. Arrodíllese o siéntese en una silla giratoria, preferentemente una que no ruede también. Coja un peso en un lado (el peso aumentará el efecto).
2. Gire el peso a su alrededor hasta el otro lado, manteniendo el brazo extendido todo el rato. Para conservar el momento angular, la silla (y usted sobre ella) debe girar en la dirección opuesta.
3. Ahora traslade el peso por delante de su cuerpo, manteniéndolo en tanto sea posible en una trayectoria que pase por el eje de la silla.
4. La silla girará en sentido contrario y desandará parte del camino hacia donde partió, pero acabará girada respecto a la posición original. Repitiendo el movimiento se puede girar una circunferencia completa si usted y la silla están bien equilibrados.



MAS ALLA DE NEWTON

La relatividad general predice desde hace mucho tiempo varios efectos que no tienen análogo en la gravitación de Newton, además de los fenómenos recientemente descubiertos de la natación y el planeo por el espaciotiempo.

EFECTO	EJEMPLO	EXPLICACION	TEORIA	ESTADO ACTUAL
Dilatación gravitatoria del tiempo	Una persona viaja cerca de un agujero negro; vuelve más joven que su gemela que se quedó en casa	El tiempo pasa más despacio en un campo gravitatorio fuerte	Inferido por Albert Einstein mientras desarrollaba la relatividad general	Se tiene en cuenta en la técnica desarrollada: el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) ha de prever la dilatación del tiempo gravitatorio en la temporización de sus señales para calcular posiciones exactas
Ondas gravitatorias	Ondas de gravedad propagándose desde un sistema estelar binario a la velocidad de la luz	Las ondas gravitatorias son oscilaciones que se propagan de la geometría del espaciotiempo, como si el propio espaciotiempo sufriera vibraciones compresoras y expansoras	De las ecuaciones de la relatividad general se sigue que ha de haber ondas gravitatorias, pero cuesta analizarlas con exactitud	Observadas indirectamente a finales de los años setenta del siglo pasado: el período orbital de un púlsar y una estrella de neutrones que formaban un sistema binario se acortaba con el tiempo, tal como se preveía que ocurriera a causa de la emisión de ondas gravitatorias. LIGO y otros experimentos buscan observaciones directas de ondas gravitatorias
Efecto Lense-Thirring	Un satélite cercano a la Tierra siente una fuerza que tira del mismo en la dirección de la rotación de la Tierra	Al igual que una pelota que girase en una melaza, una masa en rotación arrastra el propio espaciotiempo entorno, en pequeña cuantía	Predicho por Joseph Lense y Hans Thirring en 1918	En febrero de 2009 se anunció que los resultados del satélite Sonda de Gravedad B concordaban con lo predicho dentro de una incertidumbre experimental del 15 por ciento
Agujeros de gusano	Un hipotético atajo conecta dos regiones diferentes del universo	Tipos hipotéticos de energía proporcionarían espaciotiempos negativamente curvos, necesarios para constituir una estructura de agujero de gusano	Ya se habló de ellos en 1916; se demostró en 1988 que las ecuaciones de la relatividad general permiten agujeros de gusano transitables	Aún muy especulativos; la mayoría de los físicos cree que nunca se encontrarán

positivo móvil de este tipo podría actuar como un planeador, incluso en ausencia de aire.

En este caso, el efecto no tiene que ver con las características espaciales, sino con las propiedades temporales del movimiento, que sacan a la luz uno de los aspectos más profundos de las teorías de Einstein: la conexión entre el espacio y el tiempo. En la mecánica newtoniana, se especifica la ubicación de los eventos con tres coordenadas para la posición espacial y una para el tiempo, pero los conceptos de espacio y tiempo siguen siendo distintos.

En la relatividad especial, están indisolublemente entremezclados. Dos observadores con diferentes velocidades pueden no estar de acuerdo en sus mediciones de la distancia o del intervalo de tiempo entre dos sucesos, pero coincidirán en una cierta amalgama de espacio y tiempo. Por lo tanto, los observadores perciben el tiempo y el espacio, considerados por separado, de manera diferente, y sin embargo ven el mismo espaciotiempo.

En la relatividad general, la estructura del espaciotiempo se distorsiona (es decir, se curva), produciéndose así lo que percibimos como fuerza de la gravedad. Mientras que la gravedad newtoniana implica sólo el espacio, la gravedad relativista implica también el tiempo. Esta distorsión del espacio y del tiempo da lugar a efectos tales como el "arrastre de coordenadas": un cuerpo en rotación (la Tierra, digamos) ejerce en la dirección de su rotación una ligera fuerza sobre otros objetos cercanos (los satélites en órbita, por ejemplo). En palabras llanas: la Tierra en rotación arrastra ligeramente al propio espaciotiempo que la rodea. Más en general, la velocidad de movimiento de una masa influye en el campo gravitacional que produce. Arrastrar las coordenadas y planear son ejemplos de este fenómeno.

El efecto de la natación se debe a la geometría no euclídea. El planeamiento relativista constituye una consecuencia de la indisolubilidad del espacio y el tiempo. Puede que no nos hayamos percatado aún de otros fenómenos afines, sumidos en las inescrutables ecuaciones de la relatividad general. Seguramente le quedan al señor Everard, y a otros discípulos, más aventuras por contar.

Bibliografía complementaria

SPACE, TIME, AND GRAVITY: THE THEORY OF THE BIG BANG AND BLACK HOLES. Robert M. Wald. University of Chicago Press, 1992.

SWIMMING IN SPACETIME: MOTION IN SPACE BY CYCLIC CHANGES IN BODY SHAPE. Jack Wisdom en *Science*, vol. 299, págs. 1865-1869; 21 de marzo, 2003.

SWIMMING VERSUS SWINGING EFFECTS IN SPACETIME. Eduardo Guéron, Clóvis A. S. Maia y George E. A. Matsas en *Physical Review D*, vol. 73, n.º 2; 25 de enero, 2006.

RELATIVISTIC GLIDER. Eduardo Guéron y Ricardo A. Mosna en *Physical Review D*, vol. 75, n.º 8; 16 de abril, 2007.

Residuos



¿nuevas

1. DEPOSITO TEMPORAL: En el Laboratorio Nacional de Idaho los residuos nucleares siguen aguardando almacenados en contenedores secos. Más de 60.000 toneladas se reparten entre 131 almacenes provisionales, civiles y militares, por todo el país.

nucleares: ....



soluciones?

El monte Yucca era la solución propuesta para el problema de EE.UU. con los residuos nucleares. Transcurridos 22 años, esa idea se ha desvanecido. Ahora, según algunas voces, la solución más inteligente a corto plazo sería no hacer nada • MATTHEW L. WALD

CONCEPTOS BASICOS

- La administración Obama ha cancelado definitivamente el plan para almacenar los residuos nucleares en el monte Yucca.
- Durante el futuro previsible, el combustible gastado seguirá almacenándose *in situ* en 131 emplazamientos de Estados Unidos.
- El fin del plan Yucca significa que todas las opciones para el destino de los residuos nucleares están ahora en juego, incluidos el reciclado, su empleo en reactores avanzados y el enterramiento en otros lugares.

Dos semanas después de que el presidente Obama cancelara el proyecto del monte Yucca, el lugar cercano a Las Vegas donde durante 22 años el gobierno federal estuvo pensando instalar un cementerio nuclear, llegaba a Washington, D.C., James L. Conca, geoquímico, con una idea en el cartapacio.

Conca ha sido designado por el estado de Nuevo México para controlar el medio en torno a otro vertedero nuclear federal, de plutonio procedente de la industria de defensa, y allá donde otros ven inconvenientes, él ve oportunidades.

Las grandes batallas acerca de los residuos nucleares han generado muchos análisis y discusiones, confrontaciones legales épicas y un *souvenir* fabricado en masa: una bolsa de plástico, con el rótulo "Sal gema del Pérmico", que contiene transparentes trozos de cristal extraídos de la Planta Experimental 2 de Aislamiento de Residuos, a más de 650 metros bajo el desierto de Chihuahua, en las afueras de Carlsbad (Nuevo México). Conca, director del Centro de Investigaciones y Controles Medioambientales de Carlsbad, de la Universidad estatal de Nuevo México, se complace regalando esas bolsitas, y pide a los receptores que sostengan los cristales en alto bajo la luz solar y fuercen la vista a través de la sal traslúcida, como si estuvieran comprobando la frescura de un huevo.

En el seno de los pedazos se ven pequeñas burbujas de agua, o inclusiones, atrapadas hace 225 millones de años, trazas de un mar antiguo, hoy desaparecido. Recuerdan un poco a las burbujas atrapadas en la gelatina. Esas inclusiones revelan a qué velocidad puede el agua, el principal vector de dispersión de los residuos, atravesar la roca. En este caso, dice Conca, la cronología es alentadora. La sal se desplaza naturalmente poco a poco para cerrar las grietas, con lo que el agua queda atrapada. "La permeabilidad no es baja, es nula", afirma. Cuando se trata de un lugar para depositar algo que puede resultar peligroso durante un millón de años —los residuos que iban a enviarse a Yucca, por ejemplo—, "no sería posible ingeniar algo mejor", observa.

La postura de Conca no la comparten los cargos políticos electos de Nuevo México; si la compartiesen, la discusión ya habría terminado. Pero es una indicación de que mientras el problema de los residuos nucleares sigue pendiente, hay soluciones razonables. Algunas, como Carlsbad, se asemejan a Yucca, si no por la ubicación, sí en la índole: son sitios estables. Otros expedientes se basan en procesos de reciclado de creciente complicación. Pero mientras los cargos electos no pongan en práctica un plan alternativo —un proceso, si Yucca revela una pauta, que podría durar decenios—, los residuos languidecerán en 131 almacenes repartidos por todo el país (*véase la figura 4*).



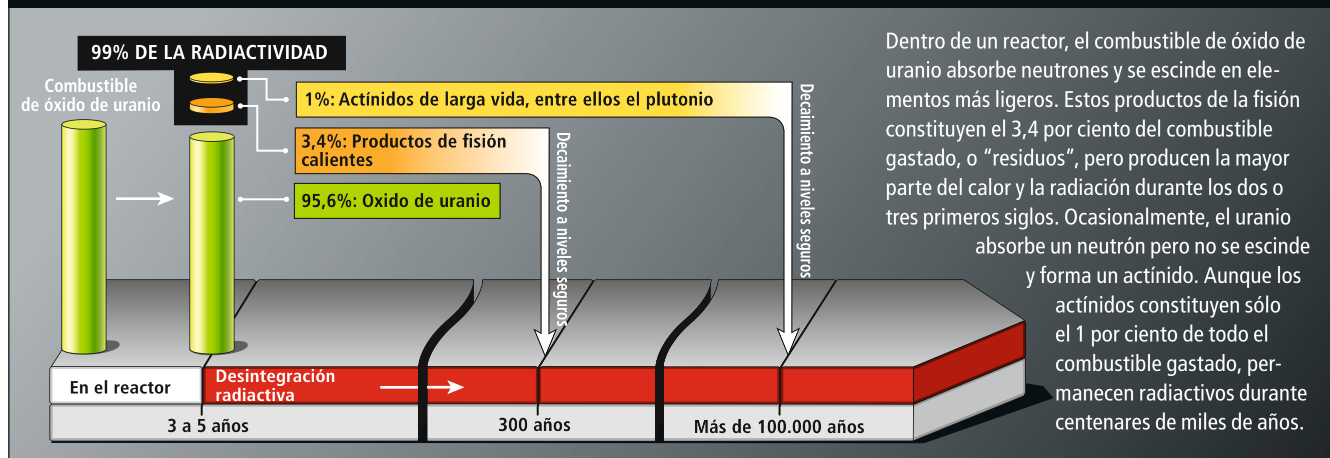
2. UN LUGAR SEGURO: El geoquímico James L. Conca sostiene que el mejor sitio para almacenar los residuos nucleares es el interior de los depósitos de sal del subsuelo profundo del desierto de Nuevo México. La sal (*derecha*) se ajusta naturalmente para rellenar las grietas que aparecen en los cristales, con lo que todo lo que se entierre dentro permanecerá atrapado.

El colapso

Ese retraso podría no ser del todo negativo. Hasta ahora al menos, los residuos a la espera que se almacenan in situ en las centrales nucleares están perfectamente inventariados y gestionados. No se derraman desde una laguna de almacenamiento, como ocurrió en diciembre de 2008 con 3800 millones de litros de residuos carboníferos tóxicos de una central térmica de la Autoridad del Valle del Tennessee. Y a diferencia del dióxido de carbono, no se liberan a la atmósfera en inquietantes partes por millón. No obstante, se acumulan y perduran, a veces más que el reactor que los produjo. El debate sobre los residuos nucleares se alarga desde hace tanto, que ya hay diez lugares "huérfanos", mausoleos radiactivos de centrales desaparecidas cuyos residuos allí siguen.

Puede que "residuos" no sea el vocablo correcto; técnicamente, el término para la masa de material a enterrar es "combustible nuclear gastado". El combustible nuclear civil se presenta al principio en forma de "elemento de combustible": un haz de tubos de pared delgada rellenos de pastillas cerámicas de óxido de uranio con el tamaño de una goma de borrar. En ausencia de neutrones libres, ese uranio es sumamente estable. Los especialistas de la central manejan el combustible nuevo sin otra

PETER ESSICK *Getty Images* (*páginas anteriores*); *SCIENTIFIC AMERICAN* (*esta página*)



JEN CHRISTIANSEN

prenda especial que unos guantes blancos, que protegen el combustible, no a los operarios. Tras llevarlo a su destino, se baja el combustible a la zona más exterior de la circular vasija del reactor, que se sella y funciona así de uno a dos años. Pasado ese tiempo se abre la vasija, se retira el combustible más interno, es decir, el más antiguo, y el combustible más reciente se traslada hacia el centro. Habitualmente, un elemento de combustible dado permanece en la vasija durante tres ciclos (de tres a seis años).

Para cuando se retira un elemento de combustible, contiene productos de fisión altamente radiactivos, como el estroncio 90 y el cesio 137, que generan decenas de kilowatt de calor. Si se dejara que se enfriase al aire, el metal que rodea al material nuclear se fundiría; incluso podría arder.

Para evitarlo, los elementos se guardan sumergidos en una piscina de hormigón revestido de acero con un agua tan límpida, que una sola gota de agua del grifo la contaminaría. Aunque esos productos de fisión están muy calientes, no tardan tanto en enfriarse. Su período de semidesintegración —el tiempo que tarda el material en transmutarse en elementos más estables y liberar radiación— se mide sólo en cosa de años. La generación de calor disminuye en un 99 % en el primer año. Se ha reducido en un factor de cinco para cuando el combustible cumple los cinco años, y otro 40 por ciento para el décimo año.

Pasados unos años, ya no es necesario almacenar las barras en agua. Se las introducen entonces en manguitos de acero, que se drenan, secan, rellenan de gas inerte a presión y sellan. Esos manguitos se cargan en grandes contenedores de hormigón que se guardan in situ, junto al reactor. Dentro de su silo de hormigón y acero, el combustible genera tan poco calor, que lo enfría la circulación natural del aire.

A largo plazo, la dificultad radica en los actínidos, materiales que se crean cuando el uranio absorbe un neutrón pero no llega a escindirse. Los períodos de semidesintegración de tales elementos son del orden de centenares de miles de años. El Departamento de Energía (DOE) se propuso demostrar que Yucca sería un emplazamiento seguro durante 10.000 años, pero reconoció que las liberaciones máximas de radiación tendrían lugar pasados unos 300.000 años. Los adversarios se aferraron a esa disparidad y en 2004 el Tribunal de Apelaciones de EE.UU. para el Circuito Federal sentenció que el DOE tenía que probar que los residuos podrían almacenarse sin peligro durante un millón de años.

Desde un punto de vista científico, Yucca nunca fue el candidato predilecto. Esa estructura volcánica se convirtió en el primer candidato por la decisión, en 1987, de los mejores "geólogos" del Senado de EE.UU. Antes de que terciaran los políticos, con la intención de acelerar el proceso de selección y también de asegurar que los residuos no irían a ningún otro sitio, Yucca estaba en una lista de posibles emplazamientos, junto con otros lugares de Texas y del estado de Washington. El DOE y su agencia predecesora pusieron esos lugares en la lista por sus posibilidades científicas y en parte por razones de conveniencia; en el caso del monte Yucca, el terreno ya era de propiedad federal y se hallaba junto a un polígono de ensayos nucleares.

Yucca ha quedado ahora excluida de la competición más o menos por la misma razón: la política. En 1987 el presidente de la Cámara de Representantes era Jim Wright, texano como George W. Bush, por entonces vicepresidente. El jefe de la mayoría en la Cámara era Tom Foley, del estado de Washington, y Harry Reid era senador por Nevada en su primer mandato. Los sitios del estado de Washington

El autor

Matthew L. Wald se ocupa en el *New York Times* de los asuntos relativos a la energía desde 1979.

Yucca fue elegido como futuro emplazamiento del cementerio nuclear por el senado de EE.UU.

y Texas se cayeron de la lista. Ahora Reid es el jefe de la mayoría y el presidente ganó los cuatro votos electorales de Nevada en parte por su promesa de reconsiderar la cuestión de los residuos nucleares. La geología política ha cambiado.

Una evaluación puramente científica de las conformaciones geológicas podría dar con una solución mejor. "La sal es muy aceptable desde una perspectiva geológica", dice Allison M. Macfarlane, geoquímica y profesora de ciencias y políticas ambientales de la Universidad George Mason, posible integrante de la Comisión Reguladora Nuclear. Pero, señala, si la sal se calienta, las inclusiones acuosas se ponen en movimiento y fluyen hacia el calor, por lo que para enterrar en sal el combustible gastado habría que esperar hasta que se enfriasen un poco los productos de desecho calientes: allá por la segunda mitad de este siglo.

En julio de 2007, Macfarlane colaboró en la organización de un congreso, convocado bajo el nombre de "Hacia un plan B para definir el destino de los residuos nucleares de alta actividad radiactiva y larga duración", donde se patentizó la inexistencia de tal plan B. Pero EE.UU. podría hallar otra solución, dice, si siguiera un proceso más abierto e imparcial para elegir los emplazamientos; en otras palabras, si se apartase a los políticos de la elección.

El plan B

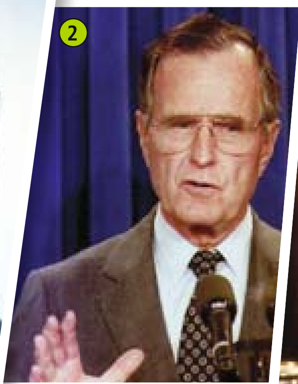
Nunca imaginó nadie que pudiera llegarse a tal situación. La Ley sobre Gestión de Residuos Nucleares de 1982 estipulaba que las compañías eléctricas tenían que depositar en un Fondo Fiduciario para Residuos Nucleares, administrado por el gobierno, un décimo de centavo por cada kilowatt-hora de energía generada por sus reactores. El gobierno, a su vez, se comprometía a buscar un lugar para enterrar los residuos. El DOE obligó a las empresas a firmar contratos y prometió que, en enero de 1998, empezaría a admitir entregas de residuos. Antes de que el presidente Obama presentara su presupuesto para 2010, en el que asignaba con desgana al monte Yucca sólo 197 millones de dólares, la fecha inaugural oficial estaba fijada para el 2017.

A partir de esa fecha, el Departamento sería responsable de perjuicios a las compañías por valor de siete mil millones de dólares, posiblemente el mayor recargo por demora del mundo. Y el importe subía 500 millones de dólares por cada año de retraso. Si se pudieran conjuntar la ciencia y la ingeniería, un acuerdo ahorraría mucho dinero.

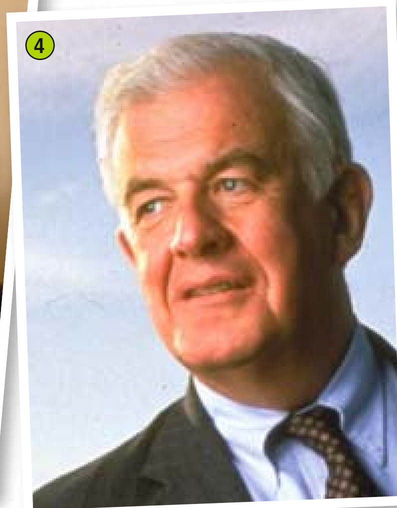
Otra solución posible vuelve a una decisión tomada hace más de treinta años. En volumen, aproximadamente el 95,6 por ciento del combustible gastado que sale de un reactor es el mismo óxido de uranio del combustible original. El resto del combustible gastado se compone de productos de fisión calientes (3,4 por ciento) y actínidos de vida larga, como el plutonio (1 por ciento). En los inicios de la era nuclear, el plan consistía en reciclar el uranio y el plutonio para obtener combustible nuevo, y desechar sólo los productos de fisión de vida corta. En teoría, eso reduciría el volumen del residuo hasta el 90 por ciento.

Pero el presidente Gerald Ford proscribió el reciclado en 1976 y su sucesor, el presidente Jimmy Carter, ex oficial de la armada nuclear,









3. EL FINAL DE UNA ERA: Los políticos alumbraron el cementerio de Yucca y los políticos lo mataron. Si bien otros países reciclan su combustible nuclear gastado, es este un proceso que genera un plutonio que podría ser robado y empleado para construir un arma nuclear; por ese temor, el presidente Gerald Ford (1) prohibió el reciclado en 1976. Ello dejó el enterramiento como única opción. Se encontraron tres lugares adecuados: uno en Texas, otro en el estado de Washington y Yucca, en Nevada. Entonces, en Texas residían el vicepresidente George H. W. Bush (2) y Jim Wright (3), presidente de la Cámara de Representantes. El jefe de la mayoría en ésta, Tom Foley (4), era del estado de Washington. A Nevada, políticamente débil, se le asignó el emplazamiento pese a la fuerte oposición de Harry Reid (5), senador en su primer mandato. Actualmente, Harry Reid es el jefe de la mayoría en el Senado, y Nevada, estado electoralmente clave, votó por Obama el pasado noviembre. A principios de este año, Steven Chu (6), secretario de energía del presidente Obama, anunciaba que en estos momentos el asunto de Yucca (7) está "aparcado".

DIRCK HALSTEAD *Getty Images (Ford)*; JENNIFER LAW *Getty Images (Bush)*; DIANA WALKER *Getty Images (Wright)*; ROB LEWINE *Getty Images (Foley)*

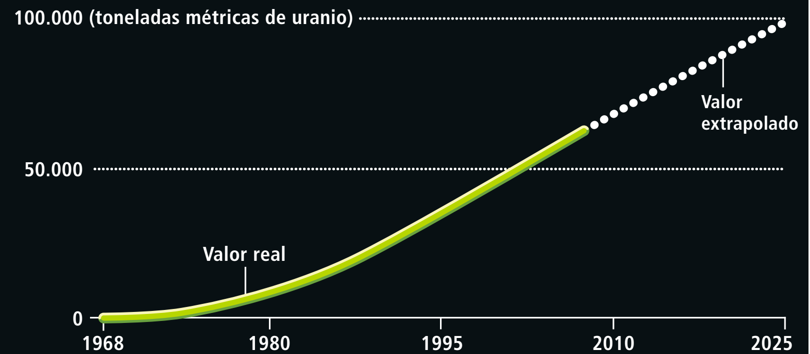
estuvo de acuerdo con él. La razón que manifestaron fue el riesgo de proliferación; el plutonio podía también emplearse para bombas, por lo que las técnicas de reprocesado podrían suponer un riesgo en el Tercer Mundo. (La rentabilidad tampoco era muy propicia.)

Con la decisión de Ford, EE.UU. se comprometió con un ciclo de combustible "abierto", lo que significa que el combustible hace un recorrido único —"de la cuna a la tumba"— en oposición al ciclo "cerrado", en que gran parte del combustible pasaría una segunda o una tercera vez por el reactor. Así mismo, la cuestión de los residuos se convirtió en recurrente dentro del debate nuclear. A lo largo de los años se han presentado diversas propuestas. Algunos han recomendado lanzar el material al espacio (todo un reto, dado el peso y el porcentaje de éxitos de los vehículos de lanzamiento, que no es el ideal). Otros han sugerido que se entierren los residuos en los límites de las placas geológicas y dejar que con el paso de los eones retornen al manto terrestre.

Sin embargo, los residuos siguen llenando las piscinas de combustible gastado para luego ser trasladados a contenedores secos, los silos de hormigón revestido de acero. Aunque el almacenamiento en contenedores secos pueda parecer una solución precaria y temporal, hay razones para recomendarlo. Salvo que ocurra un accidente, del estilo de que se cayese un manguito sobre los soportes del combustible en la piscina, pocas cosas podrían ir mal. Es concebible que un ataque terrorista agrietase un contenedor, pero el material que contiene seguiría siendo sólido; no iría muy lejos. Un grupo terrorista con granadas autopropulsadas y habilidad para apuntarlas bien podría hallar objetivos mucho más devastadores que los contenedores secos.

¿Dónde los ponemos?

El combustible gastado procedente de los reactores nucleares de EE.UU. continúa acumulándose



DEUDA NUCLEAR: Antes de que el proyecto Yucca se cancelara, el depósito iba a acoger 70.000 toneladas métricas de combustible gastado. Se calcula que EE.UU. alcanzará esa cantidad en 2012. Los nuevos enfoques del problema de los residuos deben enfrentarse con ese atraso acumulado durante varios decenios.

Tampoco el espacio disponible constituye una preocupación inmediata. "En las centrales nucleares existentes hay espacio suficiente. Si no para lo que queda de siglo, sí para buena parte del mismo", apunta Revis James, director del Centro de Evaluación de Técnicas Energéticas del Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica, un consorcio de compañías eléctricas radicado en Palo Alto (California). "Podríamos", dice, "ir tirando con los depósitos de superficie durante bastante tiempo". Y prosigue: "estamos hablando de un volumen de residuos que, en comparación con la magnitud general de las cosas, apenas si es nada". (Según la Organización Internacional de Energía Atómica, un reactor de 1000 megawatt produce al año del orden de 33 toneladas de combustible gastado, que cabrían en un camión grande.)

Al enfrentarnos a la amenaza del calentamiento global, sería un error descartar la energía nuclear —energía que no genera gases





SCOTT J. FERRELL *Getty Images* (*Reid* y *Chu*); JOE CAVARETTA *AP Photo* (*Monte Yucca*); JEN CHRISTIANSEN (*ilustración*); FUENTE: ADMINISTRACIÓN DE INFORMACIÓN ENERGÉTICA

de invernadero— por el problema de los residuos, aduce. Además, los residuos son de por sí variables. Cuanto más tiempo se mantengan en almacenaje provisional, tanto más material se desintegrará y tanto más fácil será su manejo. Aunque la ley federal en vigor establece la capacidad de Yucca en términos de toneladas, en realidad el límite lo fija el calor.

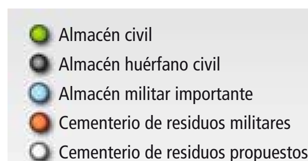
Si el combustible está bastante caliente y apretadamente empaquetado para que haga hervir el agua freática, se generará un vapor que podrá fracturar la roca; los residuos acabarían escapando antes. Cuanto más viejo sea el combustible, menos calor desprenderá y menor será el repositorio requerido. (Mejor dicho, menor será el *número* de repositorios requeridos; en 2017, EE.UU. ya habrá acumulado mucho más desecho nuclear que lo que se suponía que Yucca podía legalmente admitir.)

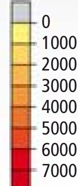
Como consecuencia, el papel del almacenaje en contenedores secos ha mudado de su papel original de solución a corto plazo al de solución viable a medio plazo. Los reactores en servicio funcionan bajo la suposición de que existe una "garantía razonable", aunque hoy no haya repositorios, de que habrá uno en 2025. Al ser ahora insostenible tal premisa, la Comisión Reguladora Nuclear tantea ya otra manera de expresarse: afirma que los residuos, hasta que haya posibilidad de enterrarlos, pueden guardarse dentro de contenedores en los emplazamientos de los reactores durante decenios y sin efectos ambientales lesivos. Ese cambio facilitaría la construcción de nuevos reactores, aun careciendo de un plan a largo plazo para los residuos que esos reactores generen.

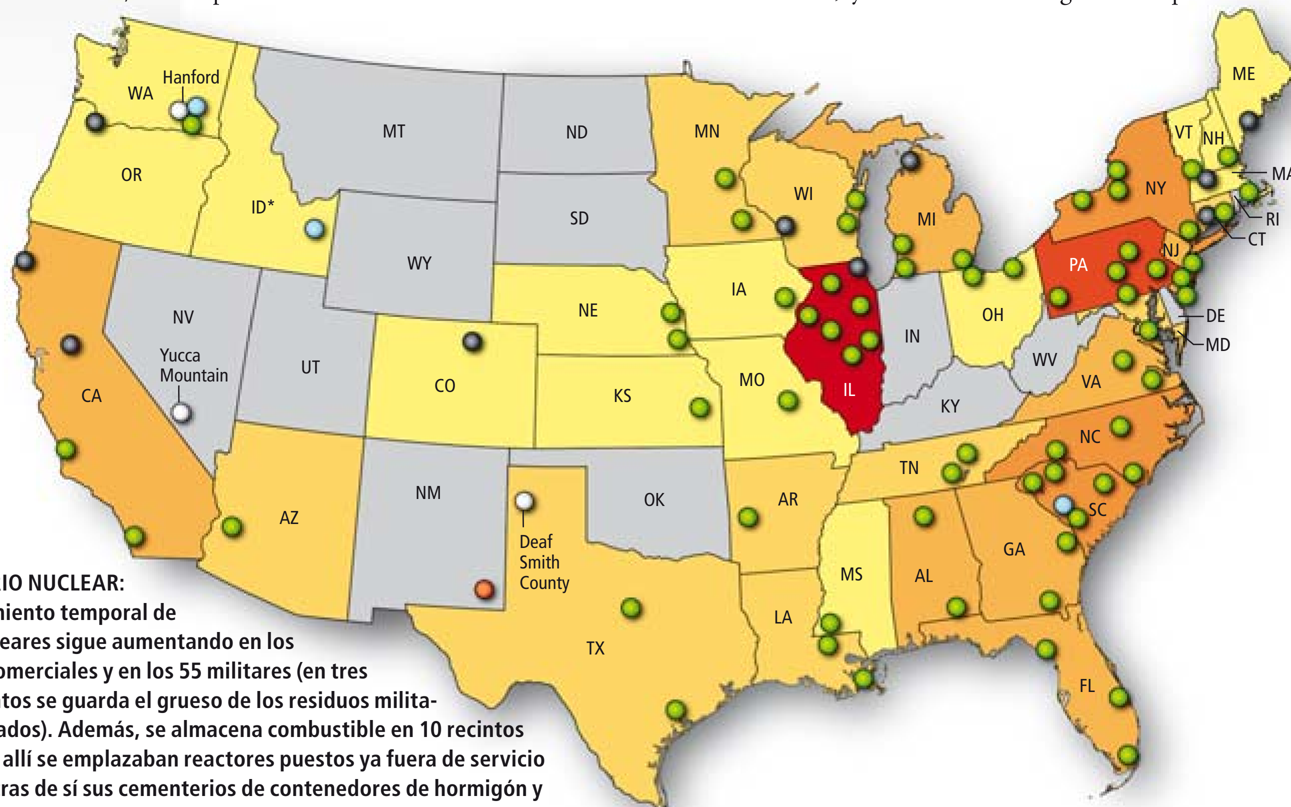
No todos participan de ese optimismo. Este mismo año, Arjun Makhijani, presidente del Instituto de Investigaciones Energéticas y Medioambientales, un grupo antinuclear, elevó a la Comisión su opinión discrepante. Sostenía que era irresponsable admitir que algún día dispondremos de lugares de enterramiento. "Una explicación científica de la expresión 'garantía razonable' requiere bien una prueba física de que existe una tal instalación (de almacenamiento de largo plazo)", escribió, o bien pruebas sólidas de que podría construirse una con la técnica disponible. Sin embargo, dice, no hay un modelo validado de instalación de ningún tipo que demuestre que sea alta la probabilidad de que los residuos vayan a permanecer aislados durante centenares de miles de años.

Otros se oponen al almacenamiento a largo plazo en superficie. Desde luego, a la industria nuclear le agradaría que el gobierno se llevase los residuos bajo tierra, fuera de la vista y de la mente. Mantener el material en la superficie significa además que pasamos la patata caliente a las generaciones futuras. "Creo que es un modo de escurrir el bulto", dice Macfarlane. "Hemos de buscar una solución". El almacenamiento en superficie implica un control oficial, y dice: "Nada nos garantiza qué

Los residuos son de por sí variables. Cuanto más tiempo se mantienen en almacenaje provisional tanto más fácil es su manejo.







4. PURGATORIO NUCLEAR: El almacenamiento temporal de residuos nucleares sigue aumentando en los 66 recintos comerciales y en los 55 militares (en tres emplazamientos se guarda el grueso de los residuos militares no enterrados). Además, se almacena combustible en 10 recintos "huérfanos"; allí se emplazaban reactores puestos ya fuera de servicio que dejaron tras de sí sus cementerios de contenedores de hormigón y acero, bajo la constante vigilancia de la seguridad de la propia instalación.

JEN CHRISTIANSEN; FUENTES: INSTITUTO DE ENERGIA NUCLEAR Y COMISION REGULADORA NUCLEAR

¿QUE SE PUEDE HACER CON LOS RESIDUOS?

El Secretario de Energía Steven Chu ha designado una comisión de estudio para examinar las distintas opciones sobre el tratamiento de los residuos nucleares. Son tres las opciones principales, cada una con sus partidarios y sus adversarios. En el fondo, no se excluyen entre sí; EE.UU. podría buscar, y seguramente lo hará, una política basada en alguna combinación de las tres opciones.

	INCERTIDUMBRE ECOLOGICA	RIESGO DE PROLIFERACION	COSTO	OPINION
ENTERRAMIENTO: En un depósito subterráneo similar al de Yucca, de ubicación no determinada			$$	Hay fondos, pero la política y la ciencia aún tienen que cerrar filas
ALMACENAMIENTO EN SUPERFICIE: Contenedores de hormigón y acero en las centrales			$	No es una solución a largo plazo, aunque al cabo de 100 años sería más fácil enterrar los residuos
RECICLADO EN REACTORES: Transforma los residuos en más energía, pero tiene un costo			$$$$	El reprocesado supone un riesgo de contaminación y requiere un parque de reactores de nuevo tipo

gobierno tendremos dentro de cien años, ni siquiera si habrá gobierno".

Acelerar el agotamiento

Hay otra alternativa: acelerar la cadena de desintegración. Aunque los centros de reciclado nuclear que EE.UU. rechazó en el decenio de los setenta únicamente pueden reciclar el plutonio del combustible gastado, el plutonio es sólo uno de los actínidos de vida larga. Una solución más clara y general es la transmutación industrial: un reactor de nuevo tipo que fisione los actínidos [*véase* "Residuos nucleares", por William H. Hannum, Gerald E. Marsh y George S. Stanford; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero 2006].

General Electric está promocionando un "reactor rápido" que fisiona los actínidos con neutrones de alta energía, las mismas partículas subatómicas que sostienen las reacciones en cadena en los reactores de la generación actual, sólo que se mueven a una velocidad mucho mayor. "Reduce el volumen en alrededor de un 90 por ciento y el período de semidesintegración, que ahora es de centenares de miles de años, a menos de mil", sostiene Lisa Price, vicepresidenta para combustibles nucleares de GE Hitachi Global. "Podría cambiar las características que haya de tener el repositorio de largo plazo." (En los cálculos se supone también que el uranio recuperado se vuelve a utilizar, algo muy difícil en los reactores actuales.)

Para reciclar de esa manera el combustible gastado se requiere un reactor rápido nuevo por cada tres o cuatro de los ahora en funcionamiento, una dificultad grave en unos momentos en que la industria tiene problemas hasta para reanudar la construcción de reactores del tipo de los que construía hace 30 años. Uno de los argumentos en contra de esos reactores es su coste: el refrigerante de los reactores rápidos es sodio fundido en vez de agua, y se calcula que el costo del modelo avanzado sería de entre mil millones y dos mil millones de dólares más que el de un reactor corriente de potencia similar [*véase* "El reciclado nuclear", por Frank N. von Hippel; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio 2008]. A finales de la administración Bush, los demócratas bloquearon en el Congreso la mayoría de los fondos para reactores rápidos; Obama se opone también a esa financiación.

Finalmente, siempre podría volverse a Yucca. "En treinta y nueve estados hay residuos de alto nivel, tanto combustible gastado civil como de la Armada o procedente de programas de defensa", explica Edward F. Sproat III, el funcionario del DOE a cargo del proyecto Yucca durante los dos últimos años y medio de la administración Bush. El destino de la totalidad de los residuos es Yucca "y no hay otro lugar adonde enviarlos". El y otros sostienen que el presidente Obama y el senador Reid tienen poder para bloquear los fondos, pero no para cambiar la enmienda de 1987 a la Ley de Gestión de Residuos Nucleares, que señala exclusivamente a Yucca. Y si el Congreso debate sobre otros lugares, afirma, "todos saben que el estado por el que hayan sido elegidos volverá a entrar en el juego".

Bibliografía complementaria

NUCLEAR ENERGY: PRINCIPLES, PRACTICES, AND PROSPECTS. David Bodansky. American Institute of Physics, 2004.

Department of Energy Office of Civilian Radioactive Waste Management, Yucca Mountain Repository: www.ocrwm.doe.gov/repository

SAFETY AND SECURITY OF COMMERCIAL SPENT NUCLEAR FUEL STORAGE: PUBLIC REPORT. Committee on the Safety and Security of Commercial Spent Nuclear Fuel Storage. National Research Council, 2006: www.nap.edu/catalog/11263.html

Defensa imposible

Anna Gili, Mercè Rodríguez, Josep-Maria Gili

A lo largo de la evolución, las plantas han desarrollado refinados sistemas defensivos. Los habituales son de tipo morfológico: estructuras que reducen la posibilidad del ataque por herbívoros. Uno de los ejemplos clásicos, del continente africano, lo ofrecen las acacias, frecuentes en la sabana. Sus largas espinas protegen las hojas y los frutos; una altura notable las resguarda de depredadores diversos.

Sin embargo, existe una especie que ha coevolucionado con estos árboles. Nos referimos a la jirafa (*Giraffa camelopardalis*). Este herbívoro sortea las espinas de las acacias, su alimento favorito, con la ayuda de una lengua negra, dura y larga (unos 45 centímetros de longitud en los adultos) y unos labios acabados en punta y muy duros que les permiten recoger las hojas; un largo cuello les ayuda a alcanzar las ramas superiores. Algunas especies de acacia complementan su defensa con la presencia de especies comensales como las hormigas, que viven en agallas. Se establece un mutualismo: la planta ofrece néctar a las hormigas y éstas la defienden frente a la agresión de los herbívoros.

1. En este paisaje de la sabana africana domina la acacia paraguas (*Acacia abyssinica*), así llamada por la forma de la copa. Llega a alcanzar 15 metros de altura.

ANNA GILI, MERCE RODRIGUEZ Y JOSEP-MARIA GILI



2. Agalla en la que viven hormigas *Crematogaster mimosae*.



3. Pese a las espinas protectoras (*derecha*), las cortas hojas de las acacias no logran escapar de la lengua prensil de las jirafas (*abajo*).



4. La acacia silvadora (*Acacia drapanolobium*) se protege de antílopes, gacelas y cebras (herbívoros más bajos que la jirafa) mediante millares de espinas blanquecinas.





Causas *de la* enfermedad celíaca

ALESSIO FASANO

Gracias al estudio de esta patología provocada por los alimentos se ha descubierto un proceso que quizás actúe en numerosas enfermedades autoinmunitarias

Si tuviese que elegir la revolución científica más importante de todos los tiempos, tendría que remontarme unos 10.000 años. Aconteció en Oriente Medio, cuando el hombre se percató de que, a partir de las semillas que caían al suelo surgían nuevas plantas, un descubrimiento que condujo al nacimiento de la agricultura. Antes de producirse esta observación, el género humano basó su dieta en frutas, frutos secos, tubérculos y, de vez en cuando, carne. Los grupos emigraban hacia donde hubiese alimentos; quedaban a merced de los acontecimientos y se hacía imposible establecer asentamientos duraderos.

Tras descubrir el secreto de las semillas, los humanos aprendieron rápidamente a domesticar los cultivos hasta llegar a entrecruzar distintas variedades de plantas. Crearon así granos tan básicos para la alimentación como el trigo, el centeno y la cebada, que eran nutritivos, versátiles, fáciles de almacenar y, además, tenían valor comercial. Por primera vez, los humanos podían abandonar la vida nómada y levantar ciudades. No es coincidencia que las primeras áreas cultivables se convirtieran también en las "cunas de la civilización".

Sin embargo, tuvo que pagarse un precio elevado por este avance: la aparición de la enfermedad celíaca (celiaquía), que surge al ingerir una proteína del trigo, el gluten, o proteínas similares presentes en el centeno y la cebada. Anteriormente, el gluten y sus proteínas afines habían estado ausentes de la dieta humana. Pero a partir del momento en que los granos empezaron a servir como combustible para el crecimiento de comunidades estables, las proteínas comenzaron a matar a personas (sobre todo a niños), cuyo organismo reaccionaba ante ellos de forma anormal. En última instancia, la ingestión repetida de esas proteínas habría hecho que los individuos sensibles perdieran la capacidad de absorber los nutrientes presentes en los alimentos. Las víctimas habrían padecido también dolores abdominales crónicos y diarreas; ofrecerían el aspecto característico de las personas que mueren de inanición: cuerpo escuálido y vientre hinchado. La malnutrición, junto con toda una serie de complicaciones adicionales, habría hecho que su vida fuese corta y miserable.

Si esas muertes se hubiesen tenido en cuenta por aquella época, su causa hubiese resultado un misterio. Sin embargo, durante los últimos veinte años, los científicos han venido ahondando en la celiaquía. Ya saben que se trata de una enfermedad autoinmunitaria en la que el sistema inmunitario ataca a los tejidos del propio organismo. Saben también que la enfermedad no surge únicamente por la exposición al gluten y proteínas afines, sino a través de una combinación de factores, entre los que se incluyen una predisposición genética y anomalías en la estructura del intestino delgado.

Y no sólo eso, la celiaquía nos proporciona un ejemplo ilustrativo del modo en que una tríada de ese tipo (desencadenante ambiental, genes de sensibilidad y anomalía intestinal) pueden contribuir a las enfermedades autoinmunitarias. Por tanto, la investigación sobre la celiaquía sugiere nuevos tratamientos, no sólo para la propia enfermedad, sino también para otros trastornos autoinmunitarios como la diabetes de tipo I, la esclerosis múltiple y la artritis reumatoide.

Descubrimientos preliminares

Tras el advenimiento de la agricultura, pasaron miles de años antes de que se tuviese constancia de la existencia de niños bien alimentados —en apariencia—, pero desnutridos. La enfermedad celíaca recibió este nombre en el siglo I d.C., cuando Areteo de Capadocia, médico griego, realizó la primera descripción científica denominándola *koiliakos* (*koelia* significa "abdomen" en griego). Se considera al médico británico Samuel Gee el padre moderno de la enfermedad. En una conferencia



LOS ALIMENTOS QUE CONTIENEN TRIGO, centeno o cebada desencadenan una reacción autoinmunitaria (contra los propios tejidos del organismo) en las personas que padecen la enfermedad celíaca. La respuesta deteriora el revestimiento intestinal e impide la absorción de nutrientes. En los celíacos, la exposición crónica a estos alimentos puede provocar cáncer y otros efectos nocivos.

que impartió en 1887, la describió como "una especie de indigestión crónica que se presenta en personas de cualquier edad, aunque parece afectar de forma especial a niños de entre uno y cinco años". Acertó incluso al suponer que "la causa podría deberse a defectos en la dieta". Sin embargo, se le escapó la verdadera naturaleza de la enfermedad, como se deduce de la dieta que prescribía: sugería alimentar a esos niños con finas rodajas de pan, tostadas por ambos lados.

La identificación del gluten como el desencadenante de la enfermedad tuvo lugar después de la segunda guerra mundial, cuando el pediatra holandés Willem-Karel Dicke se dio cuenta de que un racionamiento del pan en los Países Bajos, debido a la guerra, se tradujo en una notable disminución de la tasa de mortalidad en los niños celíacos: de más del 35 por ciento se redujo casi a cero. También dejó constancia de que después del conflicto, cuando el trigo volvió a estar disponible, la tasa de mortalidad recuperó los niveles anteriores. A partir de esa observación, otros científicos investigaron los componentes del trigo y descubrieron que la principal proteína de ese grano, el gluten, era la responsable de la enfermedad celíaca.

Volviendo a los efectos biológicos del gluten, se descubrió que, en pacientes celíacos, la exposición reiterada a esta proteína provocaba inflamaciones y lesiones crónicas en las estructuras digitiformes del intestino delgado (vellosidades intestinales), de modo que perdían la capacidad de desempeñar sus funciones normales, a saber, descomponer los alimentos y transportar los nutrientes a través de la pared intestinal hacia el sistema circulatorio, que los distribuye por todo el organismo. Afortunadamente, si la enfermedad se diagnostica a tiempo y los pacientes se someten a una dieta sin gluten, la arquitectura del intestino delgado vuelve, casi siempre, a su estado normal o prácticamente normal, con lo que desaparecen los síntomas gastrointestinales.

En un celíaco, el gluten provoca inflamación y lesiones intestinales mediante la estimulación de células inmunitarias. A su vez, esas células provocan daños en los tejidos sanos, en el cumplimiento de su función destructora de lo que perciben como un agente infeccioso.

Anticuerpos delatores

Aún se están estudiando muchos de los mecanismos mediante los cuales el gluten afecta a la actividad inmunitaria, pero un hallazgo ya ha demostrado su utilidad en la práctica clínica: una de las características distintivas de la respuesta inmunitaria aberrante hacia el gluten es la producción de moléculas de anticuerpo dirigidas contra la transglutaminasa tisular; esta enzima se escapa del interior de las células dañadas situadas en las zonas inflamadas del intestino delgado e intenta ayudar a reparar el tejido circundante.

El descubrimiento de que estos anticuerpos son tan abundantes en el organismo celíaco ha sumado una nueva herramienta para el diagnóstico de la enfermedad. Asimismo, ofrece una nueva forma de evaluar la incidencia del trastorno (mediante análisis para determinar la presencia del anticuerpo en sangre). Hasta entonces, los médicos disponían sólo de

CONCEPTOS BASICOS

- La celiaquía es una enfermedad autoinmunitaria desencadenada por la ingestión de gluten, una proteína muy abundante en el trigo, o proteínas similares presentes en otros granos.
- La investigación sobre las causas que la provocan indica que esta enfermedad se desarrolla cuando una persona expuesta al gluten presenta una predisposición genética hacia la celiaquía y una pared intestinal inusualmente permeable.
- Parece que la misma causa triple (desencadenante ambiental, tendencia genética y aumento de la permeabilidad intestinal) desencadena otras enfermedades autoinmunitarias. Ello abre la posibilidad de que los nuevos tratamientos contra la celiaquía alivien también diversas patologías.

JUPITERIMAGES (*fotografía*); JEN CHRISTIANSEN (*fotoilustración*)

pruebas inespecíficas; la manera más fiable de diagnosticar la enfermedad consistía en revisar los síntomas del paciente, confirmar la inflamación intestinal mediante una biopsia del intestino y determinar si una dieta sin gluten aliviaba los síntomas. (La detección de anticuerpos contra el gluten no es determinante, porque también están presentes en personas que no son celíacas.)

Durante años, la celiaquía fue considerada una enfermedad rara fuera de Europa. En EE.UU., se detectaban los síntomas en menos de una persona de cada 10.000. En 2003, publicamos los resultados de nuestro estudio, el más extenso de los llevados a cabo en EE.UU., con una muestra de más de 13.000 sujetos. Aunque parezca increíble, hallamos que una de cada 133 personas en apariencia sanas estaba afectada, lo que significaba que la enfermedad era casi 100 veces más frecuente de lo que se creía. El trabajo de otros investigadores ha confirmado que, en numerosos países, los niveles son parecidos; ningún continente se libra.

¿Cómo es posible que el 99 por ciento de los casos haya pasado inadvertido durante tanto tiempo? Los síntomas externos clásicos (indigestión permanente y diarrea crónica) aparecen sólo cuando resultan gravemente dañadas regiones extensas del intestino delgado. Si la disfunción afecta sólo a un segmento reducido del intestino o la inflamación es leve, los síntomas pueden ser menos intensos o atípicos.

Hoy en día también está claro que la enfermedad celíaca se manifiesta con frecuencia mediante un abanico de síntomas que anteriormente habían pasado inadvertidos, ocasionados por interrupciones locales de la absorción intestinal de nutrientes. La interrupción de la absorción de hierro provoca anemia; una absorción deficiente de folato ocasiona toda una serie de problemas neurológicos. Al privar al organismo de determinados nutrientes, la celiaquía provoca síntomas como la osteoporosis, dolor de articulaciones, fatiga crónica, atrofia, lesiones en la piel, epilepsia, demencia, esquizofrenia y ataques de apoplejía.

Dado que la enfermedad celíaca se presenta a menudo de forma atípica, muchos casos siguen sin diagnosticarse. Esta nueva capacidad del reconocimiento precoz de la enfermedad en todas sus formas permite eliminar el gluten de la dieta antes de que surjan complicaciones de mayor gravedad.

Del gluten al trastorno inmunitario

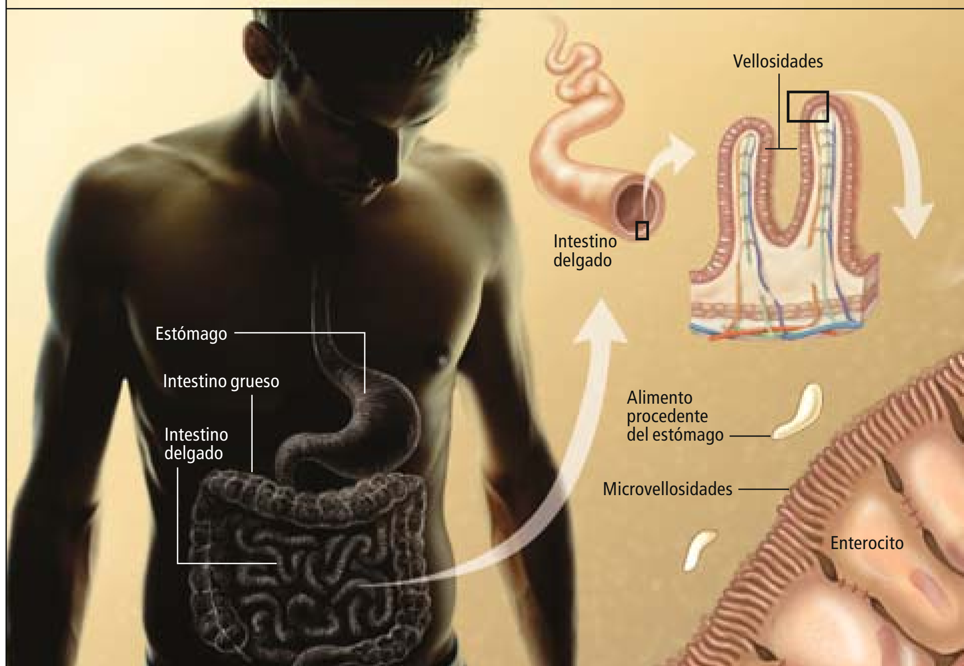
La celiaquía proporciona un modelo sumamente valioso para comprender los trastornos autoinmunitarios, pues constituye el único ejemplo en el que la adición o eliminación de un sencillo componente ambiental, el gluten, activa o desactiva la enfermedad. (Aunque se sospecha que hay factores ambientales que desempeñan una función similar en otras enfermedades autoinmunitarias, ninguno de ellos ha sido identificado.)

Para ver cómo provoca el gluten efectos devastadores en determinadas personas, consideremos la respuesta del organismo en la mayoría de la población. En los que no padecen la enfermedad celíaca, el organismo no reacciona. En condiciones normales, el sistema inmunitario entra en acción sólo cuando detecta determinada cantidad de proteínas ajenas al organismo y reacciona con agresividad: los intrusos pueden ser una señal de la llegada de microorganismos patógenos, como bacterias o virus.

Una de las principales formas que tenemos de encontrarnos con proteínas u otras sustancias extrañas es a través de la alimentación. La infantería inmunitaria se dispone por debajo de las células epiteliales que revisten el intestino (enterocitos), lista para abalanzarse sobre esas proteínas forasteras y avisar a los refuerzos. Una de las razones por las que nuestro sistema inmunitario no suele activarse ante semejante invasión proteínica que tiene lugar tres veces

DIGESTION NORMAL

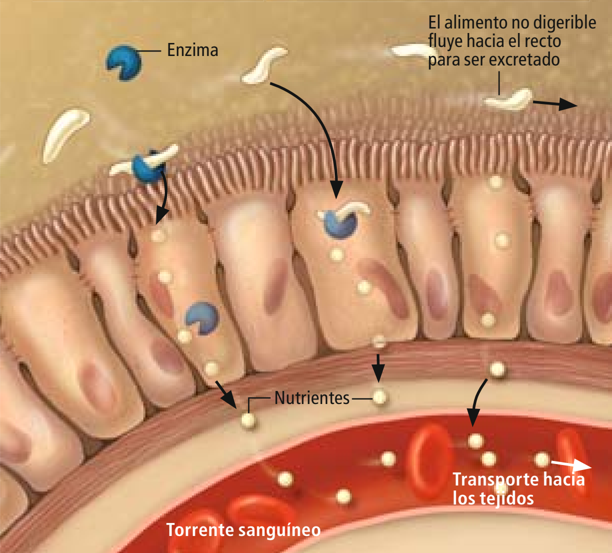
En el tracto digestivo sano, los alimentos parcialmente digeridos en el estómago pasan al intestino delgado, que está revestido de protuberancias digitiformes o vellosidades (*abajo, izquierda*). Enzimas del páncreas y de la superficie de las células epiteliales que constituyen las vellosidades (enterocitos) descomponen la mayoría de los alimentos en sus constituyentes más pequeños, como glucosa y aminoácidos (*abajo, derecha*). A continuación, los nutrientes pasan al torrente sanguíneo para servir de combustible a todos los tejidos del organismo. La enfermedad celíaca interrumpe la absorción de nutrientes, lo que daña a los enterocitos y reduce la longitud de las vellosidades; con ello se limita la superficie disponible para interaccionar con los alimentos (*micrografías*).



El autor

Alessio Fasano es profesor de fisiología pediátrica en la Universidad de Maryland. Dirige el Centro para la Investigación de la Biología de las Mucosas y el Centro para la Investigación Celíaca de la misma universidad. Su campo de investigación abarca la función de la permeabilidad intestinal en el desarrollo de la enfermedad celíaca y otros trastornos autoinmunitarios.

GETTY IMAGES (*sistema digestivo*); JEN CHRISTIANSEN (*fotoilustración*); KIM MOSS *Electronic Publishing Services*, INC. (*intestino*)



CENTRO DE INVESTIGACION CELIACA, ESCUELA DE MEDICINA DE LA UNIVERSIDAD DE MARYLAND (*micrografías*);

al día es que, antes de que nuestras defensas entren en contacto con cualquier sustancia que pueda causar problemas, el sistema gastrointestinal descompone la mayoría de las proteínas ingeridas en aminoácidos estándar, los materiales de construcción con los que se fabrican todas las proteínas.

El gluten, sin embargo, posee una estructura peculiar. Abunda en los aminoácidos glutamina y prolina. Merced a esa propiedad, parte de la proteína opone resistencia a nuestra maquinaria trituradora de proteínas, dejando intactos pequeños fragmentos proteínicos (péptidos). Aun así, en las personas sanas, la mayoría de esos péptidos permanecen en el tracto gastrointestinal y son excretados antes de que el sistema inmunitario alcance a detectarlos. La cantidad de gluten que consigue abrirse paso a través del revestimiento gastrointestinal es demasiado pequeña para activar la respuesta de un sistema inmunitario sano.

Por otro lado, los celíacos han heredado un conjunto de genes que contribuye a aumentar la inmunosensibilidad al gluten. De entre éstos podemos citar determinadas variantes génicas que codifican antígenos leucocitarios de histocompatibilidad (HLA). El 95 por ciento de las personas que sufren la enfermedad celíaca posee el gen que codifica la proteína HLA-DQ2 o el que codifica la HLA-DQ8; en la población general, ese porcentaje se halla entre un 30 y un 40 por ciento. Este y otros hallazgos sugieren que los genes que codifican HLA-DQ2 y HLA-DQ8 no son los únicos causantes de la hiperactividad inmunitaria. No obstante, resulta prácticamente imposible que se desarrolle la enfermedad sin uno de ellos. El estudio de la función de las proteínas que especifican estos genes ha arrojado luz sobre la importancia de los mismos.

Las proteínas HLA-DQ2 y HLA-DQ8 son fabricadas por las células presentadoras de antígenos. Estos centinelas del sistema inmunitario engullen los organismos y proteínas extraños, los fragmentan, seleccionan determinados fragmentos proteicos que encajan en las cavidades de las moléculas de HLA y exponen los complejos resultantes sobre la superficie de la célula para que experimenten un meticuloso escrutinio por parte de los linfocitos T coadyuvantes, otras células del sistema inmunitario. A continuación, las células T, que reconocen y se unen a los complejos exhibidos, llaman a rebato a los refuerzos.

En los celíacos, la transglutaminasa tisular liberada por las células del epitelio intestinal se adhiere al gluten sin digerir y modifica los péptidos, de forma que permite que se unan de un modo extremadamente fuerte a las proteínas DQ2 y DQ8. En consecuencia, cuando las células presentadoras de antígenos situadas por debajo de las células del epitelio intestinal capturan los complejos formados por la transglutaminasa tisular y el gluten, las células enlazan el gluten con las HLA y envían estos complejos hacia la superficie celular, donde activan a las células T, haciendo que liberen citoquinas y quimioquinas (moléculas que estimulan más aún la actividad inmunitaria). Esos productos químicos y el incremento de las defensas inmunitarias serían muy valiosos en el caso de un ataque microbiano. Mas, aquí, no hacen ningún bien y lesionan las células intestinales responsables de la absorción de nutrientes.

Los pacientes con celiaquía tienden a presentar otras predisposiciones genéticas. Entre ellas, una tendencia a fabricar un exceso de IL-15 (inmunoestimulante) y a albergar células inmunitarias hiperactivas que, en respuesta a la presencia del gluten, inician el ataque inmunitario contra el intestino.

Culpable por asociación

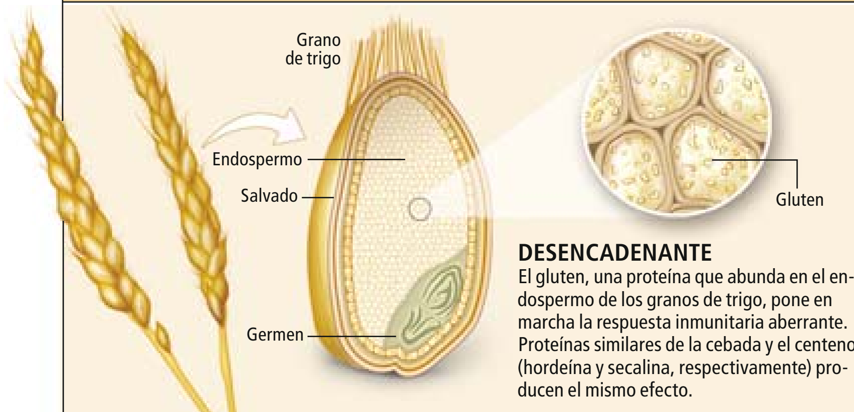
¿Qué función podrían desempeñar los anticuerpos contra la transglutaminasa tisular en esta reacción patológica ante el gluten? La respuesta todavía no es completa, pero los

ALGUNOS DATOS

- El 1 por ciento de la población mundial padece la enfermedad celíaca, aunque la mayoría no lo sabe.
- En EE.UU. hay más de dos millones de personas afectadas.
- En niños, algunos de los síntomas más frecuentes son: dolor abdominal, inflamación, estreñimiento, diarrea, pérdida de peso y vómitos.
- Alrededor de la mitad de los adultos que padecen la enfermedad no experimentan diarrea en el momento del diagnóstico.
- Otros síntomas que se pueden presentar en adultos son: anemia, artritis, pérdida de masa ósea, depresión, fatiga, infertilidad, dolor de las articulaciones, apoplejías y entumecimiento en manos y pies.

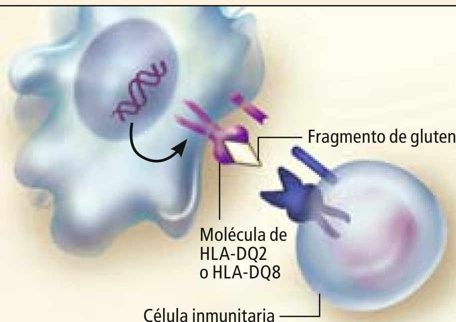
CAUSA TRIPLE

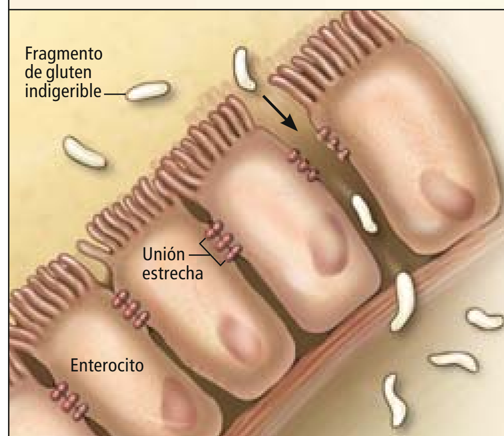
Tres son los factores desencadenantes de la enfermedad celíaca: un estímulo ambiental, una predisposición genética y, según las investigaciones del autor, un intestino más permeable de lo habitual (*abajo*). El autor sospecha que esta misma tríada básica interviene en otras enfermedades autoinmunitarias, aunque cada trastorno tenga sus propios desencadenantes y componentes genéticos.



DESENCADENANTE
El gluten, una proteína que abunda en el endospermo de los granos de trigo, pone en marcha la respuesta inmunitaria aberrante. Proteínas similares de la cebada y el centeno (hordeína y secalina, respectivamente) producen el mismo efecto.

PREDISPOSICION GENETICA
Casi todos los celíacos son portadores del gen para la proteína HLA-DQ2, del gen para la proteína HLA-DQ8 o de ambos. Estas moléculas HLA exponen fragmentos de gluten a las células inmunitarias que, posteriormente, dirigen un ataque contra el revestimiento intestinal. También parece probable que haya otros genes implicados, pero éstos variarían de una persona a otra.





INTESTINO DELGADO PERMEABLE
En la mayoría de la gente, las uniones estrechas mantienen "pegadas" las células intestinales. En los celíacos, las uniones se deshacen, permitiendo que gran cantidad de fragmentos indigeribles de gluten se filtren hacia el tejido subyacente y estimulen a las células inmunitarias. Los tratamientos que reducen las filtraciones aliviarían no sólo la celiaquía, sino también otras enfermedades inmunitarias en las que intervienen intestinos más permeables de lo habitual.

científicos se hacen una idea de lo que podría ocurrir. Cuando las células del epitelio intestinal liberan la transglutaminasa tisular, las células B del sistema inmunitario la ingieren, sola o unida al gluten. A continuación, estas células liberan anticuerpos dirigidos contra la enzima. Si los anticuerpos se unen a la transglutaminasa tisular alojada sobre las células del epitelio intestinal, o en su cercanía, los anticuerpos en cuestión podrían dañar directamente a las células o llevar a cabo otros procesos destructivos. Pero todavía no se sabe si son ellos los que provocan el daño.

Durante los últimos nueve años, el autor y sus colaboradores han venido comprobando que la permeabilidad atípica del intestino no sólo parece contribuir a la celiaquía, sino también a otras enfermedades autoinmunitarias. Aumenta por días el número de pruebas que sugieren que en el origen de la mayoría de las enfermedades inmunitarias, si no de todas, se encuentra el mismo trío de factores: una sustancia del entorno que entra en contacto con el organismo, una predisposición genética del sistema inmunitario a sobrerreaccionar ante esa sustancia y un intestino más permeable de lo normal.

Descubrimiento de la filtración

Es justo reconocer que, al principio, la teoría de que un intestino permeable contribuye a la enfermedad celíaca y a la autoinmunidad en general fue recibida con escepticismo debido, en parte, a la idea que se tenía entonces sobre los intestinos. Cuando estudiaba medicina en el decenio de los setenta, se describía el intestino delgado como una tubería formada por una capa de células encajadas entre sí a la manera de losetas, mediante un engrudo impermeable de uniones estrechas. Se creía que las uniones estrechas mantenían a todas las moléculas (salvo las de menor tamaño) alejadas de los componentes del sistema inmunitario presentes en el tejido que rodea al tubo. Ese modelo elemental, en el que las uniones estrechas se asociaban a una suerte de masilla inerte e impermeable, no estimuló el estudio de su estructura. Entre los que se mostraban fríos se contaba el autor de este artículo.

Un inesperado giro del destino, y uno de los momentos más decepcionantes de mi carrera, me llevó a las uniones estrechas. A finales de los ochenta, trabajaba en el desarrollo de una vacuna contra el cólera. En aquella época, a la toxina del cólera se le atribuían las devastadoras diarreas que caracterizan a la enfermedad. Para comprobar tal aserto, mi equipo eliminó el gen que codifica la toxina del cólera de la bacteria *Vibrio cholerae*. Suponíamos que, al desarmar de esta forma a las bacterias se convertirían en una vacuna ideal, porque el resto de las proteínas presentes en una bacteria viva provocaría una intensa respuesta inmunitaria que protegería contra la diarrea.

Pero cuando administramos a voluntarios nuestra bacteria atenuada, la vacuna provocó un número de diarreas suficiente como para suspender el ensayo. Me dejó abatido. Años de duro trabajo se habían ido literalmente por el sumidero. Teníamos sólo dos opciones: tirar la toalla y cambiar de proyecto de investigación o perseverar en el intento, tratando de averiguar qué es lo que falló. Nuestra intuición nos decía

KIM MOSS *Electronic Publishing Services, Inc.*

que se nos estaba escapando algún detalle. Decidimos escoger la segunda opción. Aquella decisión nos condujo al descubrimiento de una nueva toxina que provocaba la diarrea mediante un mecanismo hasta entonces desconocido. Este proceso cambiaba la permeabilidad del intestino delgado mediante la disolución de esas uniones estrechas, supuestamente inertes; como resultado, se permitía el paso de fluidos desde los tejidos hacia el intestino. La "masilla" de marras iba a resultar interesante.

Casi al mismo tiempo, una serie de hallazgos clave demostró que las uniones estrechas constaban de un refinado entramado de proteínas. Sin embargo, se disponía de muy poca información sobre cómo se controlaban tales estructuras. En ese contexto, el descubrimiento de nuestra toxina, a la que denominamos "toxina de la *zonula occludens*" (esto es, toxina de las uniones estrechas), o Zot, proporcionó una valiosa herramienta para aclarar el mecanismo de control. Descubrimos que una molécula, Zot, desmantelaba la compleja estructura de las uniones estrechas. Nos percatamos también de que el sistema de control que hacía posible el desmantelamiento era demasiado complicado para haber evolucionado hacia la provocación de un daño biológico en el huésped. *Vibrio cholerae* debe causar diarreas aprovechando una ruta ya existente en el huésped para regular la permeabilidad intestinal.

A los cinco años después de avanzar esa hipótesis, descubrimos la zonulina, la proteína que, en humanos y en otros animales superiores, aumenta la permeabilidad intestinal mediante el mismo mecanismo que la proteína bacteriana Zot. Ignoramos el modo en que utiliza el organismo la zonulina en provecho propio. Lo más probable es que esta molécula, segregada por el tejido epitelial del intestino y por células de otros órganos (las uniones estrechas desempeñan funciones importantes en todos los tejidos del organismo), se encargue de varias tareas, entre las que se incluyen la regulación del movimiento de fluidos, macromoléculas y células inmunitarias entre los diversos compartimentos del organismo.

El descubrimiento de la zonulina nos animó a buscar en la bibliografía médica enfermedades humanas caracterizadas por un aumento de la permeabilidad intestinal. Fue entonces cuando, para mi sorpresa, descubrimos que un gran número de enfermedades autoinmunitarias (celiaquía, diabetes de tipo I, esclerosis múltiple, artritis reumatoide y enfermedad inflamatoria intestinal, entre otras) tienen como denominador común una permeabilidad intestinal aberrante. En muchas de estas enfermedades, el aumento de la permeabilidad está provocado por niveles inusualmente elevados de zonulina.

Un cuarto factor

Las personas con enfermedad celíaca nacen con una predisposición genética hacia esa enfermedad. ¿Por qué algunas personas no muestran signos de la celiaquía hasta una edad tardía? Antes se pensaba que el avance de la enfermedad se producía desde la infancia, pero de forma demasiado suave para provocar síntomas. Ahora sabemos que la explicación podría ser otra, más apropiada, relacionada con las bacterias de la flora intestinal.

Estos microorganismos, la microbiota, pueden variar de persona a persona, de una población a otra e incluso dentro de un mismo individuo, a medida que éste se va haciendo mayor. Parece que también determinan qué genes se activan en su huésped en un momento dado. Por tanto, una persona cuyo sistema inmunitario se hubiera adaptado a tolerar el gluten durante muchos años podría, de repente, perder la tolerancia al mismo si la microbiota cambiase y se activasen genes asociados a la celiaquía que antes no se expresaban. Si esta idea es correcta, algún día podría prevenirse o tratar la celiaquía mediante la ingestión de determinados microorganismos beneficiosos, denominados "probióticos".

DIETA SIN TRIGO

El gluten es una de las principales razones por las que los productos horneados que contienen trigo son ligeros y esponjosos. Durante el horneado, las hebras de gluten atrapan agua y dióxido de carbono gaseoso (procedente de las levaduras y de otros agentes que intervienen en la fermentación) y se expanden. Para fabricar productos sin gluten, los panaderos suelen utilizar varios tipos de harina (así como almidones y otros aditivos); no existe ninguna variedad que reúna las mismas propiedades que la harina de trigo. Ello encarece de forma notable el producto resultante. También explica por qué es difícil que los alimentos sin gluten puedan llegar a competir con sus homólogos con gluten en cuanto a sabor y textura.



JIM McKNIGHT *AP Photo*

En la celiaquía, hoy sabemos que es el propio gluten el que induce una secreción exagerada de zonulina (debido, quizás, al patrimonio genético del paciente).

Este descubrimiento nos llevó a proponer que, en los celíacos, su mayor permeabilidad intestinal permite que el gluten (el factor ambiental) atraviese el intestino e interaccione libremente con elementos del sistema inmunitario sensibilizados genéticamente. Ello sugiere que la eliminación de cualquiera de los tres factores que provocan la autoinmunidad (desencadenante ambiental, hiperreactividad inmunitaria y permeabilidad intestinal) bastaría para detener el avance de la enfermedad.

Derrocar al trío

Como ya se mencionó anteriormente y tal como predice esta teoría, la eliminación del gluten en la dieta acaba reparando el deterioro intestinal. Desgraciadamente, mantener durante toda la vida una dieta estricta libre de gluten no resulta sencillo. El gluten es un ingrediente muy frecuente en la dieta de los humanos y, en muchos países, no aparece indicado en las etiquetas. Otra complicación adicional resulta del hecho de que los productos sin gluten no están disponibles en todas partes y son más caros que los productos homólogos que sí contienen gluten. Además, mantener escrupulosamente cualquier dieta durante años, por motivos de salud, supone un sacrificio notorio. Una terapia basada en la dieta constituye, en resumen, una solución parcial.

Se han barajado diversas estrategias terapéuticas que interfieren con al menos una de las tres etapas del proceso. La compañía Alvine Pharmaceuticals de San Carlos (California) ha desarrollado terapias orales basadas en enzimas y proteínas que degradan los péptidos del gluten que, en condiciones normales,

son resistentes a la digestión; ya tiene a uno de estos agentes en fase de ensayos clínicos. Otros están investigando formas de inhibir la transglutaminasa tisular, de suerte que no modifique químicamente los fragmentos del gluten no digerido para que adopten la forma que se une tan eficazmente a las proteínas HLA-DQ2 y HLA-DQ8.

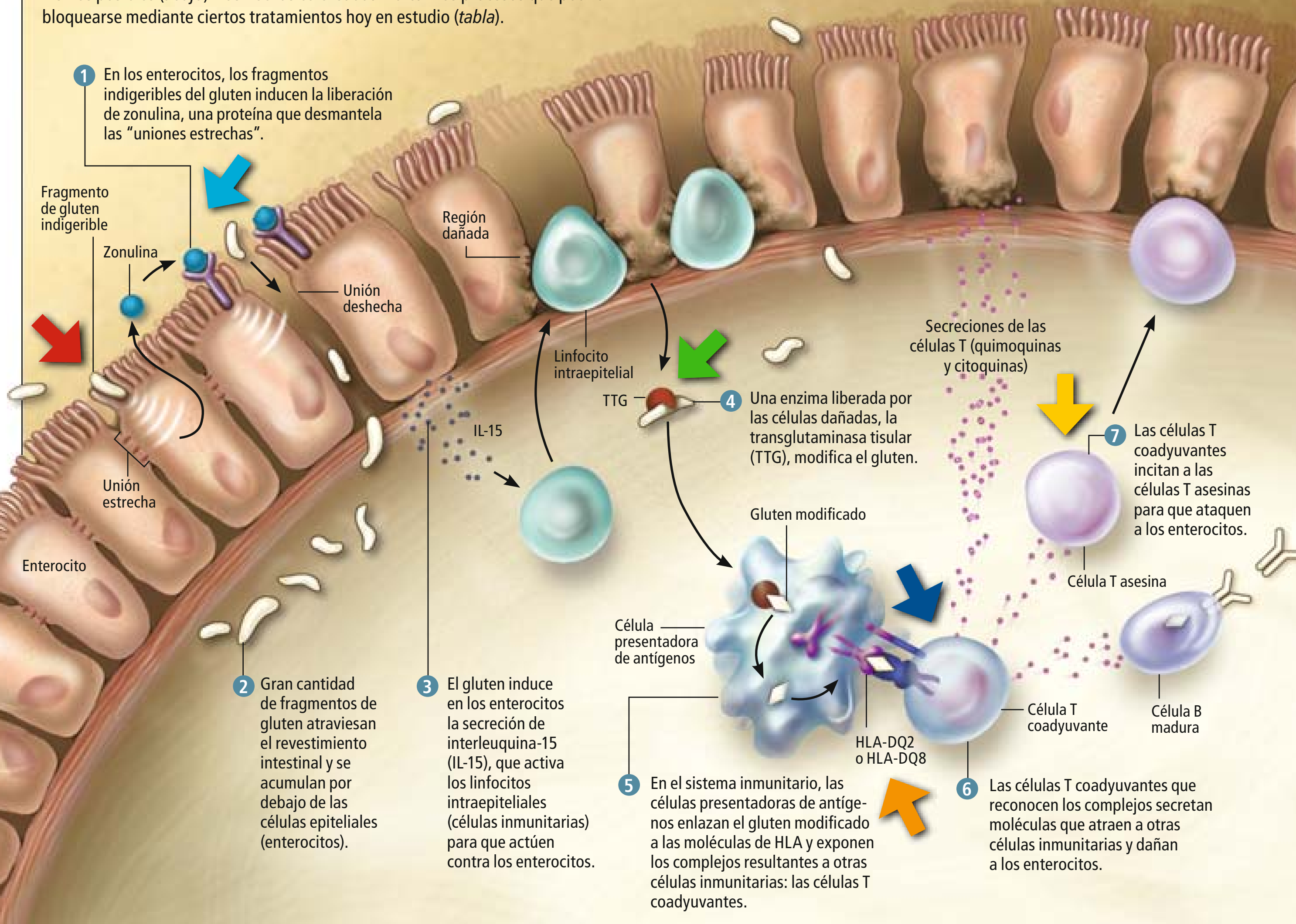
Nadie ha dado con un método seguro y ético de manipular los genes que hacen que una persona sea propensa a la enfermedad. Lo que no obsta para que los investigadores sigan empeñados en la búsqueda de terapias que pudieran amortiguar algunos de los factores genéticos que contribuyen a la hipersensibilidad del sistema inmunitario. La compañía australiana Nexpep está trabajando en una vacuna que expondría el sistema inmunitario a cantidades reducidas de una variante del gluten extremadamente inmunogénica, con la esperanza de que la exposición repetida a pequeñas dosis acabaría induciendo la tolerancia inmunitaria al gluten.

Con la mirada dirigida hacia el bloqueo de los defectos de la barrera intestinal, el autor fundó, junto con otros, Alba Therapeutics. Nos proponíamos investigar el potencial del Larazotide, un inhibidor de la zonulina. (En la actualidad, el autor es consejero científico y accionista de Alba, pero ya no participa en la toma de decisiones de la compañía.) El Larazotide se ha estudiado en dos ensayos clínicos con humanos para determinar su seguridad, tolerancia y eficacia en pacientes celíacos que ingerían gluten. Ambos cumplían el "estándar de oro" de los estudios clínicos: ensayos aleatorios, con sujetos control que reciben un placebo y en los que ni los suministradores del

KIM MOSS Electronic Publishing Services, Inc.

EL INTESTINO CELIACO

No se conocen todos los detalles sobre cómo el sistema inmunitario causa estragos en el revestimiento intestinal de los celíacos, pero se han identificado varios mecanismos posibles (*abajo*). Las flechas coloreadas indican los procesos que podrían bloquearse mediante ciertos tratamientos hoy en estudio (*tabla*).



fármaco ni los pacientes saben quién recibe el tratamiento y quién el placebo hasta que el ensayo concluye.

En conjunto, los tests no mostraron un exceso de efectos secundarios en los pacientes a quienes se suministró Larazotide, en vez del placebo. Y lo más importante, el primer estudio, más restringido, demostró que el medicamento reducía la disfunción de la barrera intestinal inducida por el gluten, la producción de moléculas inflamatorias y los síntomas gastrointestinales en los pacientes celíacos.

El segundo estudio, más amplio, presentado en una conferencia celebrada en abril, demostró que los pacientes con celiaquía que recibieron un placebo fabricaron anticuerpos contra la transglutaminasa tisular, a diferencia del grupo de pacientes que recibió tratamiento, que no los fabricaron. Es la primera vez que un fármaco interrumpe un proceso autoinmunitario mediante la acción específica contra una respuesta inmunitaria a una molécula concreta sintetizada por el organismo. Otros medicamentos que suprimen la actividad inmunitaria actúan con menor especificidad.

En fecha reciente, Alba recibió la aprobación por parte de la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de Estados Unidos para ampliar los estudios con Larazotide a otras enfermedades autoinmunitarias; entre ellas, la diabetes de tipo 1 y la enfermedad de Crohn.

Estas nuevas perspectivas terapéuticas no significan que los celíacos puedan abandonar sus restricciones alimentarias en un futuro inmediato. La dieta se utilizaría de otra manera. Bajo la dirección de Carlo Catassi, mi equipo de la Universidad de Maryland ha comenzado un estudio clínico a largo plazo para determinar si, evitando que los bebés de alto riesgo consuman alimentos con gluten durante su primer año de vida, se puede retrasar la aparición de la celiaquía o, todavía mejor, prevenirla. En este caso, "alto riesgo" significa que el bebé posee genes de proclividad y que sus familiares cercanos sufren la enfermedad.

Creemos que esta estrategia funcionaría porque el sistema inmunitario madura de forma espectacular durante los primeros doce meses de vida y porque las investigaciones realizadas en bebés expuestos a la enfermedad ha dado a entender que, al evitar el gluten durante el primer año de vida, se podría entrenar a ese sistema inmunitario incipiente a tolerar el gluten (tal y como hace la gente sana), en lugar de verse hiperestimulado por él. Hasta la fecha, hemos reclutado para nuestro trabajo a más de 700 bebés que podrían ser genéticamente propensos. De acuerdo con datos provisionales, el retraso en la exposición al gluten reduciría cuatro veces la probabilidad de que se desarrolle la enfermedad. Sin embargo, habrá que esperar decenios hasta que sepamos con seguridad si esta estrategia puede detener la enfermedad para siempre.

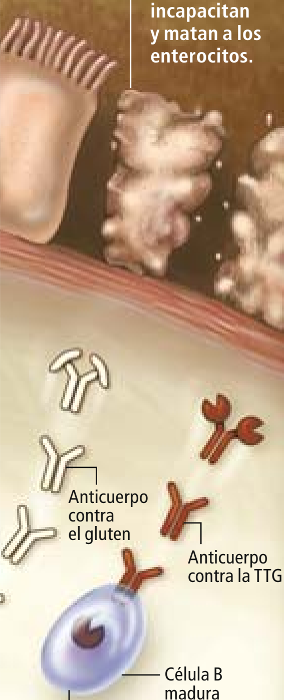
Dado que, al parecer, las enfermedades autoinmunitarias comparten una base común, los investigadores que las abordan confían en descubrir si alguna de las estrategias terapéuticas contra la celiaquía podría servir también para aliviar otras enfermedades autoinmunitarias que hoy carecen de tratamiento eficaz. Habiendo en fase de desarrollo varias estrategias para tratar la celiaquía, podemos empezar a pensar que esta enfermedad, que ha acompañado a la humanidad desde los albores de la civilización, se encuentra quizás en su último siglo de existencia sobre la Tierra.

Bibliografía complementaria

MECHANISMS OF DISEASE: THE ROLE OF INTESTINAL BARRIER FUNCTION IN THE PATHOGENESIS OF GASTROINTESTINAL AUTOIMMUNE DISEASES. Alessio Fasano y Terez Shea-Donohue en *Nature Clinical Practice Gastroenterology & Hepatology*, vol. 2, n.º 9, págs. 416-422; septiembre, 2005.

DIAGNOSIS AND TREATMENT OF CELIAC DISEASE. L. M. Sollid y K. E. A. Lundin en *Mucosal Immunology*, vol. 2, n.º 1, págs. 3-7; enero, 2009.

POSIBLES TRATAMIENTOS



Los celíacos disponen de una opción preventiva: no comer alimentos que contengan gluten. Sin embargo, dado que seguir una dieta estricta entraña cierta dificultad, los investigadores han abordado otras opciones, como las que aparecen en la lista inferior. Estamos aún en las etapas iniciales del proceso; ninguno de los medicamentos de la lista ha participado todavía en los ensayos clínicos avanzados que se requieren para aprobar su comercialización.

TERAPIA	MEDICAMENTO (INVESTIGADORES/ESTADO)
Evitar el gluten en la dieta del bebé durante el primer año de vida	Sin medicamentos (Universidad de Maryland y, por separado, la Universidad Politécnica Marche, Italia/Ensayos clínicos con humanos)
Degradar los fragmentos de gluten indigeribles, de modo que no provoquen una respuesta inmunitaria	ALV003 (Alvine y, por separado, AN-PEP en el hospital clínico de la Universidad VU, Países Bajos/ Ensayos clínicos con humanos)
Evitar que la zonulina haga que el intestino se vuelva permeable	Larazotide (Alba Therapeutics/ Ensayos clínicos con humanos)
Evitar que la transglutaminasa tisular modifique los fragmentos de gluten de modo que estimulen la respuesta inmunitaria	Sin nombre (Numerate y la Universidad de Stanford/Se está investigando en el laboratorio)
Impedir que HLA-DQ2 se una a los péptidos del gluten y los exponga a las células T coadyuvantes	Moléculas parecidas al gluten (Universidad de Leiden y, por separado, Universidad de Stanford/Se está investigando en el laboratorio)
Vacunar a los pacientes con determinados fragmentos de gluten para hacer que las células T coadyuvantes sean tolerantes al gluten expuesto por las moléculas HLA-DQ2 y no reaccionen contra él	Nexvax2 (Nexpep, Australia/Ensayos clínicos con humanos)
Impedir la llegada de las células T asesinas al revestimiento intestinal	CCX282-B (Chemocentryx/Ensayos clínicos con humanos)
Iniciar una anquilostomiasis (infección por gusanos parásitos del género *Ancylostoma*, que amortiguan las respuestas inmunitarias del huésped en el intestino)	Gusanos parásitos del género *Ancylostoma* (Hospital Princesa Alexandra, Australia, en colaboración con otros grupos/Ensayos clínicos con humanos)

FUENTES: WWW.CLINICALTRIALS.GOV; "DIAGNOSIS AND TREATMENT OF CELIAC DISEASE," POR L. M. SOLLID Y K.E.A. LUNDIN, EN *MUCOSAL IMMUNOLOGY*, VOL. 2, N.º 1; ENERO DE 2009

Desequilibrio en el ecosistema intestinal

La enfermedad celíaca se debe a la interacción de diversos factores genéticos y ambientales. El gluten es el único factor ambiental que guarda una relación directa con el desarrollo de la enfermedad. Suele ésta presentarse entre los primeros 6 y 24 meses de vida, tras la introducción del gluten en la dieta. No obstante, el número de casos que debutan en la edad adulta está aumentando, lo que indica que el gluten no es el único agente causante.

Los estudios epidemiológicos sugieren que las infecciones, el consumo de antibióticos y el tipo de lactancia determinan también el riesgo de sufrir celiaquía. A su vez, esos factores modifican la composición de la microbiota intestinal y su influencia sobre la salud. En este contexto, hay abiertas varias líneas de trabajo para elucidar la relación entre las bacterias del tracto intestinal y la enfermedad celíaca.

Los estudios microbiológicos realizados por nuestro grupo de investigación con biopsias duodenales y heces de niños celíacos han demostrado la asociación de la celiaquía a determinadas alteraciones del ecosistema intestinal. Los pacientes celíacos presentan una mayor proporción de bacterias Gram-negativas potencialmente dañinas (*Bacteroides* y *E. coli*) y menor de bacterias beneficiosas (*Bifidobacterium* y *B. longum*). Aunque esas alteraciones son más notables en la fase activa de la enfermedad, el restablecimiento de la composición de la microbiota intestinal es sólo parcial tras el seguimiento de una dieta sin gluten. De lo que se desprende que las alteraciones microbiológicas detectadas no son sólo una consecuencia secundaria del proceso inflamatorio, sino también una característica de los pacientes que puede incrementar el riesgo de sufrir esta patología.

Además, se ha detectado un mayor número de factores de virulencia en enterobacterias que colonizan el intestino de los pacientes celíacos que en las de controles sanos. Enterobacterias aisladas de individuos celíacos, tratados y no tratados con dieta exenta de gluten, presentan con mayor frecuencia genes que codifican proteínas que pueden aumentar la virulencia de tales bacterias, ya que les permiten evadir el sistema inmunitario del hospedador. Observación que sugiere la participación de la flora entérica en el origen y desarrollo de la enfermedad celíaca.

Las bacterias intestinales provocan inflamación

El intestino constituye el principal órgano inmunitario; la microbiota intestinal es uno de los principales reguladores de la función inmunitaria innata y adquirida. En nuestro grupo hemos estudiado (*in vitro*) si las alteraciones detectadas en la composición de la microbiota intestinal ejercían algún efecto nocivo sobre la respuesta inmunitaria. Hemos observado que la microbiota de pacientes celíacos estimula la síntesis de citoquinas proinflamatorias (IFN-γ, TNF-α) asociadas a la enfermedad celíaca en mayor grado que la de individuos sanos; asimismo, la inducción de la producción de IL-10 (citoquina antiinflamatoria) es menor por acción de la microbiota de los celíacos.

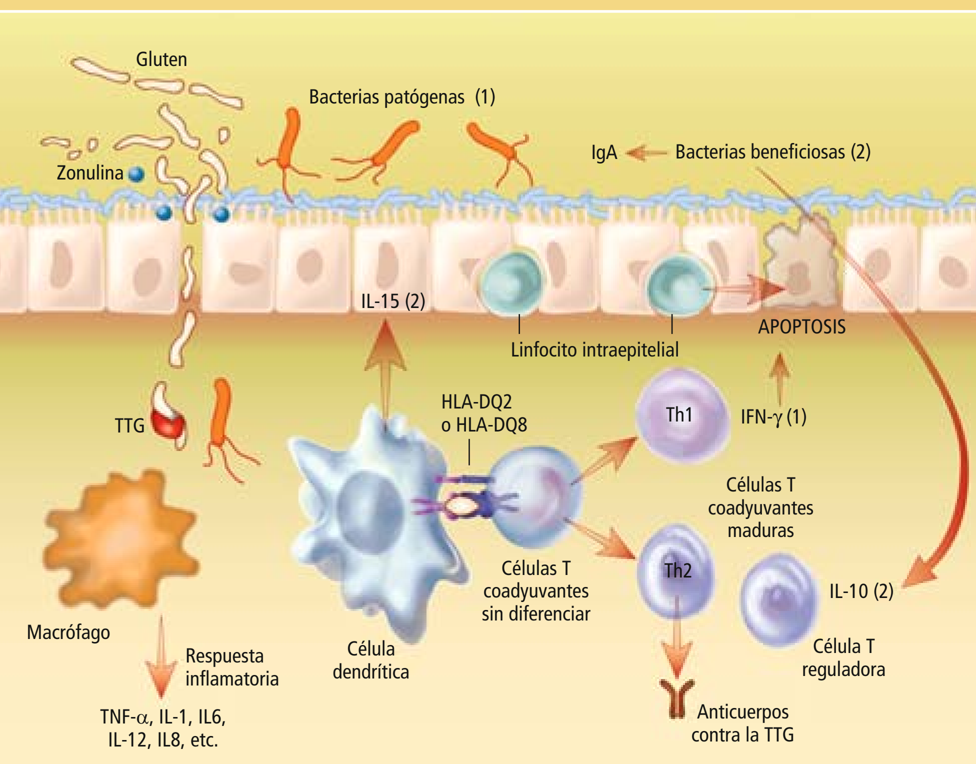
Ello demuestra que el desequilibrio del ecosistema intestinal podría favorecer la inflamación de la mucosa intestinal, típica de la celiaquía, mediante la activación del sistema inmunitario y el aumento de la producción de mediadores de la inflamación. Además, IFN-γ y TNF-α contribuyen al aumento de la permeabilidad intestinal, lo que facilita el acceso de los antígenos (gluten y microorganismos) a la submucosa, donde activan las células inmunitarias y perpetúan la inflamación.

Tratamiento con bifidobacterias

En nuestro laboratorio hemos demostrado (*in vitro*) que determinadas bifidobacterias atenúan la respuesta proinflamatoria que provocan la microbiota intestinal de pacientes celíacos y las proteínas del gluten (gliadinas), mediante la estimulación de la síntesis de IL-10 (antiinflamatoria) y la reducción de la producción de citoquinas proinflamatorias (IFN-γ, IL-15, etcétera). Estas bifidobacterias también pueden inhibir el crecimiento de las bacterias prejudiciales y ayudar a restablecer el equilibrio intestinal. Otros investigadores han comprobado que una bifidobacteria puede reducir los efectos tóxicos del gluten sobre el aumento de permeabilidad.

Apoyados en estos resultados, cabe pensar en el empleo de bacterias probióticas o estrategias similares (prebióticos) para mejorar el tratamiento y la calidad de vida de la población celíaca, mediante mecanismos que incluyan la modulación de la composición de la microbiota intestinal y la regulación de la respuesta inmunitaria al gluten. Si bien esta hipótesis todavía no se ha demostrado *in vivo*, los resultados obtenidos arrojan luz sobre la función de la microbiota intestinal en la etiología y patogénesis de la celiaquía.

Yolanda Sanz
Grupo de eco-fisiología microbiana y nutrición
Instituto de Agroquímica
y Tecnología de Alimentos, CSIC
Valencia



El gluten y la microbiota intestinal alterada de los pacientes operan de forma sinérgica en el desarrollo de la celiaquía. Se proponen varios mecanismos. Por un lado (*1*), bacterias patógenas (*naranja*) contribuyen junto al gluten a la síntesis de citoquinas proinflamatorias (IFN-γ, TNF-α) y al aumento de la permeabilidad intestinal. Por otro (*2*), bacterias comensales beneficiosas (*azul*) inhiben la invasión de patógenos y atenúan la respuesta inflamatoria mediante la inducción de la síntesis de IgA y de citoquinas antiinflamatorias (IL-10), y la reducción de la permeabilidad intestinal.

Dos mundos, una física

Galileo y sus contemporáneos superaron la estricta separación entre una física del cielo y otra de la tierra que había dominado el pensamiento transmitido desde la antigüedad griega

Jochen Büttner

Según uno de los mitos más populares de la historia de la ciencia, la caída de una manzana desde un árbol dio a Newton la idea clave de su mecánica celeste. Sin embargo, hacía ya más de medio siglo que Galileo había descrito, gracias a su ley sobre la caída de los cuerpos, cómo cae una manzana de un árbol. Por otra parte, fue también Galileo el primero en apuntar hacia el cielo un telescopio, inventado poco tiempo atrás. Cabe preguntarse, por tanto, por qué fue Newton, y no Galileo, el primero en proponer leyes mecánicas para el movimiento de los cuerpos celestes.

Aunque la historia de la manzana quizá se inventó con posterioridad, pone de relieve un aspecto crucial del descubrimiento de Newton: las leyes mecánicas que determinan algo profano y terrestre, cómo cae una manzana al suelo, son las mismas que gobiernan las trayectorias de los cuerpos celestes.

Hoy en día la idea de Newton puede parecernos casi trivial. Una de las suposiciones centrales de la física moderna es, precisamente, que las leyes que rigen el comportamiento de los fenómenos terrestres son las mismas que describen los fenómenos cosmológicos. Sin embargo, y por natural que hoy pueda parecernos esta idea (alimentada por el éxito de la física moderna), no le han faltado alternativas a lo largo de la historia.

La contraposición entre la regularidad presente en el movimiento de los cuerpos celestes y el cambio constante que caracteriza los fenómenos terrestres, en los que apenas puede apreciarse ningún orden, llevó a Aristóteles en el siglo IV a. C. a dividir el cosmos en dos regiones: una región celeste, que abarcaba hasta la Luna (el "mundo supralunar"), y otra terrestre (el "mundo sublunar"). Según Aristóteles, los fenómenos quedarían determinados por leyes completamente distintas en cada una de estas dos regiones, estrictamente separadas.

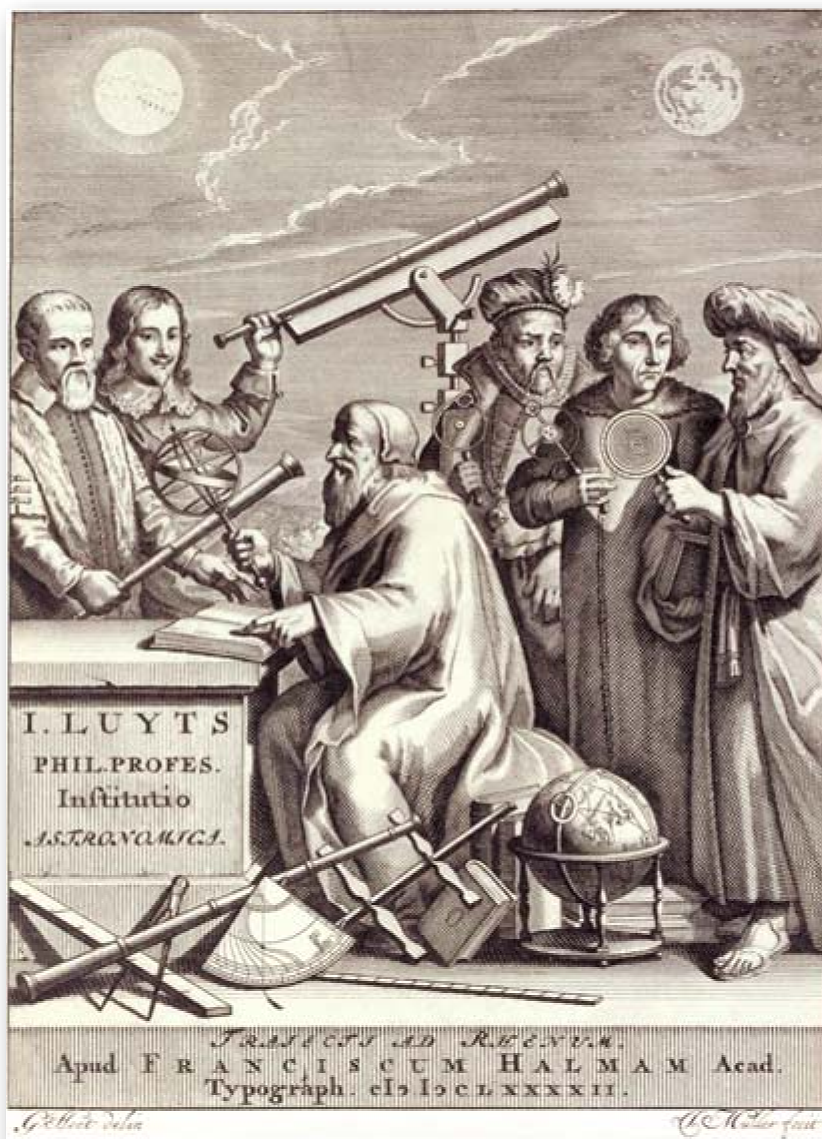
Antes que Newton, Galileo y sus contemporáneos tuvieron que enfrentarse a una serie de problemas para aplicar al movimiento de los cuerpos celestes sus crecientes conocimientos de mecánica terrestre. Para entender realmente cuáles eran estos problemas, es necesario considerar el desarrollo histórico de las ideas sobre la relación entre una física, la terrestre, y otra, la celeste.

Explicaciones mitológicas y modelos geométricos

Ya en las primeras cosmologías mitológicas podemos encontrar elementos terrestres en la explicación de los fenómenos celestes. Un mito sumerio del tercer milenio antes de Cristo describe la Luna como

CONCEPTOS BASICOS

- Una de las suposiciones centrales de la física moderna es la convicción de que las leyes que rigen el comportamiento de los fenómenos terrestres son las mismas que describen los fenómenos cósmicos. Sin embargo, bajo la influencia de Aristóteles, a principios de la Edad Moderna, se seguía admitiendo que el mundo sublunar y el supralunar eran de naturaleza completamente distinta.
- Pero la propia física celeste de Aristóteles aparece impregnada de ideas derivadas de experiencias terrestres. Con el objeto de explicar los movimientos celestes, se recurrió en los albores de la Edad Moderna a argumentos de naturaleza mecánica con una frecuencia creciente.
- Galileo franqueó la barrera entre los dos mundos al intentar explicar las velocidades orbitales de los planetas basándose en sus experimentos con planos inclinados o al ofrecer una teoría pendular de las mareas como prueba del modelo copernicano del universo.



1. ARISTOTELES (SENTADO) SEPARA LA FISICA TERRESTRE DE LA CELESTE. Galileo, Kepler (*de pie, de izquierda a derecha*) y sus coetáneos cuestionan dicha separación y comienzan a idear argumentos mecánicos con el propósito de explicar los movimientos celestes. A la derecha: Brahe, Copérnico y Ptolomeo (*de izquierda a derecha*).

una barca celeste. Para los antiguos egipcios, el mundo era un disco rodeado por una corriente de agua sobre el que se alzaba la bóveda celeste, la cual no era sino el cuerpo cubierto de estrellas de la diosa Nut. En la mitología griega, Helios guiaba su carro solar a través del cielo.

Si bien estos mitos iban más allá de las experiencias cotidianas (ni en Grecia ni en Babilonia había barcas o carros voladores, ni gigantes en Egipto), vemos aquí que, al fin y al cabo, la interpretación de estos fenómenos celestes o cosmológicos partía de fenómenos terrestres, de la vida diaria.

En las culturas primitivas, las observaciones astronómicas no sólo se enmarcaban en un contexto mítico o religioso, sino que servían también para fines de orden práctico: por ejemplo, una determinación del paso del tiempo basada en consideraciones astronómicas es útil para la planificación agrícola.

Fue la astronomía griega la primera que, a partir de la mera observación y registro de los movimientos celestes, llegaría a idear modelos geométricos capaces de reproducir las trayectorias de los astros. Supuestamente, Platón habría retado a los astrónomos griegos a responder a la siguiente pregunta: "¿Qué tipo de trayectorias uniformes y regulares ha de suponerse para explicar el movimiento aparente de los planetas?"

Sería Eudoxo de Cnidos, alumno de la Academia de Platón, el primero en elaborar un modelo geométrico general de los movimientos celestes. Dicho modelo consistía en un sistema de esferas concéntricas que rotaban en torno a la Tierra; ésta descansaba en el centro. Las posiciones del Sol, la Luna y los planetas se determinaban a partir de un punto sobre la esfera correspondiente. La última esfera contenía las estrellas fijas. Los ejes de rotación de la mayoría de las esferas no estaban fijos, sino que su posición quedaba determinada por un punto situado sobre alguna de las esferas restantes. De esta manera, las trayectorias del Sol y la Luna quedaban explicadas por el movimiento conjunto de tres esferas, mientras que las de los planetas venían regidas por el de cuatro.

Tal y como requería Platón, el sistema de Eudoxo permitía, por vez primera, explicar el complicado movimiento de los planetas mediante los efectos simultáneos de movimientos circulares más simples. La obra de Eudoxo no ha llegado a nuestros días, por lo que queda abierta la pregunta acerca de si interpretaba su sistema de esferas homocéntricas como mero modelo geométrico o, más bien, como una representación física de la realidad.

En la literatura antigua se mencionan diversos mecanismos que servían para representar modelos astronómicos. Puede considerarse un indicio de que las descripciones de los movimientos celestes del estilo de la de Eudoxo se basaban en experiencias mecánicas simples. Ninguno de esos mecanismos visualizadores ha llegado hasta nuestros días. No obstante, el "mecanismo de Anticitera" (un artefacto sumamente complejo, hallado en los restos de un naufragio cerca de la isla griega de Anticitera, que servía para determinar el movimiento de los cuerpos celestes) demuestra que existía el conocimiento técnico necesario para su construcción.

Dos mundos con físicas diferentes

Aristóteles, quien describió y adaptó para sí el sistema de Eudoxo, lo entendía como una descripción de un mundo físico, si bien completamente diferente del terrestre. Para Aristóteles, las esferas de Eudoxo eran, aunque

invisibles (transparentes), reales y arrastraban con su movimiento a los planetas, que se encontraban fijos en ellas.

Estas esferas, así como los cuerpos celestes, estaban compuestas por un elemento propio, al que Aristóteles denominó "éter" (nombre que derivó del griego *aei thein,* "en perpetuo movimiento"). Este éter eterno y divino no tenía nada en común con los elementos terrestres. Por ejemplo, no era ni ligero ni pesado; y, a diferencia de la materia terrestre, su misma naturaleza implicaba un movimiento circular.

En contraposición al modelo original de Eudoxo, la variante desarrollada por Aristóteles es mucho más que un mero modelo astronómico. Se enmarca, en su explicación del mundo, dentro de una filosofía natural universal. Esta estricta separación entre una física terrestre y otra del cielo se convertiría así en la base de un modelo del mundo que perduraría durante más de 2000 años y determinaría, durante largo tiempo, el pensamiento occidental.

Considerando la flagrante oposición entre el orden y la perfección que pueden observarse en el firmamento y el aparente desorden y carencia de reglas del mundo terrestre, caracterizado por constantes cambios e imperfecciones, la separación propuesta por Aristóteles parece razonable.

Por otra parte, resulta artificial que una separación de ese estilo intente unificar el conocimiento terrestre y el celeste bajo una misma visión global del mundo. Dado que resulta prácticamente imposible hallar un principio que permita unificar el conocimiento sobre ambas regiones, lo natural sería proponer, en su lugar, una incompatibilidad fundamental entre ambas.

¿Puede sostenerse la hipótesis de una física celeste definida, en gran parte, como una mera negación de la física terrestre? Ya en el caso de Aristóteles se hace patente que una separación así resulta, al menos en sentido estricto, apenas posible.

De Aristóteles a Galileo

En su adaptación del sistema de Eudoxo, por ejemplo, Aristóteles introdujo esferas adicionales para compensar el movimiento de las restantes esferas. Es decir, para poder obtener una descripción mecánicamente consistente, Aristóteles estaba dispuesto a adoptar considerables complicaciones en su sistema.

En su *Meteorologica,* Aristóteles plantea la pregunta acerca de por qué el Sol desprende calor. En su calidad de propiedad terrestre, el calor no habría de corresponderse con la materia celeste ni, por tanto, tampoco con el Sol. Aristóteles concluye que es más bien la constante excitación del mundo terrestre provocada por los movimientos celestes, en particular por el Sol, la que produce calor. En su explicación del fenómeno, se refiere explícitamente al fenómeno terrestre que hoy denominaríamos calentamiento por fricción, y admite, por tanto, la existencia de un efecto terrestre sobre la frontera de las regiones celeste y terrestre.

Así pues, vemos que incluso la física celeste de Aristóteles aparece impregnada de ideas derivadas de experiencias terrestres. En la tradición escolástica que seguiría más tarde a su obra, se haría cada vez más patente la imposibilidad de mantener una estricta separación entre una física del firmamento y otra de la tierra.

Con el objeto de explicar los movimientos celestes, se recurrió a argumentos de naturaleza mecánica con una frecuencia cada vez mayor. Algunos autores medievales incluso comenzaron a hablar de una *machina mundi,* una "máquina del mundo", para referirse al cosmos. Ya en el siglo XIV, Nicolás de Oresme comparó esta *machina mundi* con los engranajes de un reloj, un artefacto mecánico creado por la mano del hombre (*véase en la figura 2* el Zytglogge —la "Torre del Reloj"— de Berna, un reloj astronómico de la Baja Edad Media).

A finales del siglo XVI, Tycho Brahe afirmaba lo siguiente: "La máquina celeste no es, en forma alguna, un cuerpo fijo e impenetrable, atestado de esferas reales, como la mayoría ha venido creyendo hasta ahora". Su apunte



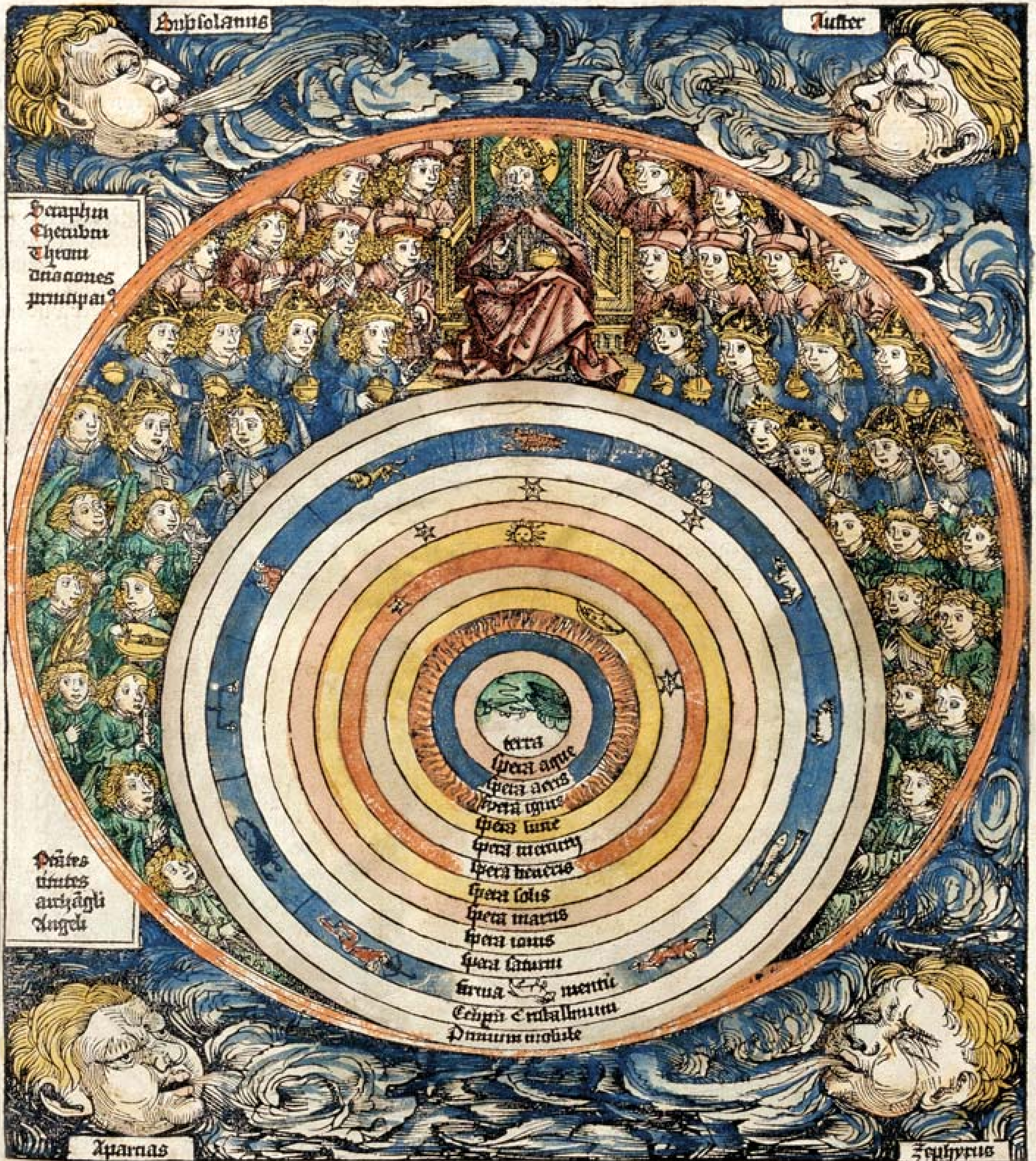
2. EL ZYTGLOGGE DE BERNA, DEL SIGLO XV. Los autores medievales compararon el cosmos con el mecanismo de un reloj. En esa época se construyeron colosales relojes astronómicos que reproducían los movimientos celestes.

SANDSTEIN/WIKIMEDIA COMMONS/*SuW*

¿Por qué fue Newton, y no Galileo, el primero en formular una misma teoría física para el cielo y la tierra?

Wonbeheyligung des sibenden tags

ALs nw die werlt durch das gepew götlicher weißheit der sechs tag: volēdet vñ himel vñ erdē beschaffē geordnet gezieret vñ zu letst volbracht wordē sind. do hat der glori wirdig got sein werck erfüllet vñ am sybendē tag von den wercken seiner hendt geruet. nach dē er die gantzē werlt vnd alle ding die dar in sind beschaffen het do hat er auffgehört. nit als zewürcken muede. sunder zemachen ein newe creatur ꝺ materi oder gleichnus mit vergangē wer dañ er hort nit auff zewürcken das werck der geperungen. vnd der herr hat den selbē tag gebenedeyet vñ geheiligt vnd ine geheyssē sabathū. das nach hebreyscher züngē ein rûe bedeüttet darūmb das er an dē selben tag ruet vō allem werck das er gemacht het. do vō auch die iuden an dem tag vō aigner arbait zefeiren erkant werdē. Dē selbē tag habē auch ettlich haidenische völker vor dem gesetz feirlich gehaltē. vnd also sein wir zū end der göttlichen werck komē. darūmb so söllen wir dē in dem alle sichtliche vnd vnsichtliche ding sind förchten. liebhaben vnd eren. vnd von dem herren des himels. von dem herren aller gütter. dem gewalt gegebē ist in himel vnd erden. die gegenwürtigen güter. souer die gut sind. vnd auch die waren seligkait des ewigen lebēs suchen.



3. EN ESTA ILUSTRACION DE LA *WELTCHRONIK* (“Crónica del mundo”, también conocida como “Crónica de Núremberg”) de Hartmann Schedel, de 1493, Dios gobierna sobre la imagen aristotélica del mundo. Estas representaciones explican gráficamente la simbiosis existente en la época entre la filosofía natural de Aristóteles y la doctrina cristiana.

demuestra la aprobación de la que gozaban en su tiempo las representaciones mecánicas del cielo. En su nuevo sistema astronómico, las esferas de los cuerpos celestes se atravesaban entre sí, por lo que Brahe deseaba reemplazar la mecánica de esferas fijas e impenetrables por esferas fluidas y permeables. Hacia finales del siglo XVI, es decir, justo cuando Galileo había empezado a interesarse por las leyes de la mecánica, nada había ya que obstaculizase la ruptura definitiva con la separación que Aristóteles había establecido entre la física del firmamento y la física terrestre, ni, por tanto, el paso a una concepción mecánica del cielo.

Sin embargo, la imagen aristotélica del mundo era, para los inicios de la Edad Moderna, mucho más que un sistema universal de filosofía natural. Venía teniendo esa trascendencia adicional al menos desde que Tomás de Aquino hizo de ella el fundamento de una interpretación del mundo basada en los postulados de la doctrina cristiana. Donde con mayor claridad se aprecia el éxito de tal síntesis de transmisión bíblica e ideas aristotélicas del mundo es, probablemente, en la identificación del Primer Motor Inmóvil aristotélico (el responsable del movimiento de las esferas celestes) con el Dios creador cristiano (*véase la figura 3*).

A partir de esta incorporación de la imagen aristotélica del mundo en la doctrina cristiana, la separación entre una física celeste y otra terrestre se elevó automáticamente a la categoría de dogma, y todos los argumentos para intentar superar esta barrera corrían el peligro de ser interpretados como heréticos.

Dos mundos, una mecánica

El desarrollo que, a grandes rasgos, hemos esbozado aquí marca el punto de partida de Galileo. Por un lado, disponía de la física aristotélica como marco conceptual de la explicación de los movimientos terrestres y sus causas. Por otro, dicha física se encontraba integrada en un sistema que describía el mundo en su totalidad y marcaba una distinción estricta entre los fenómenos celestes y los terrestres. Si bien algunos pensadores anteriores a Galileo habían superado esa barrera con argumentos de índole mecánica, la misma no había acabado de caer del todo debido (y no en último término) a sus connotaciones religiosas.

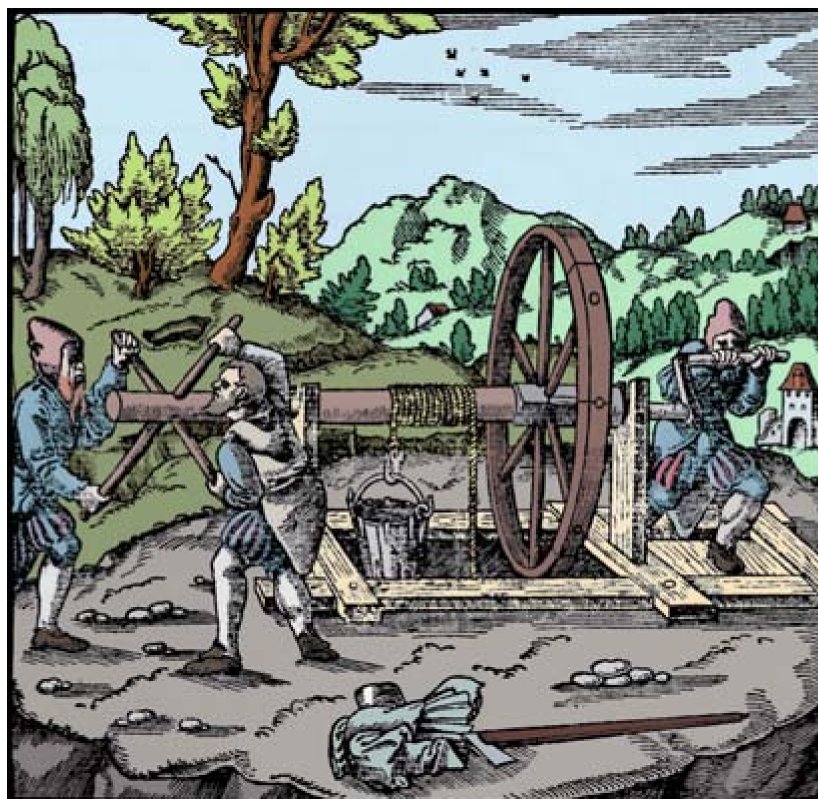
En ese contexto, se darían dos desarrollos que contribuirían de manera decisiva al pensamiento científico de Galileo: por un lado, a partir del rápido progreso en la técnica de la época, surgirían nuevos retos que conducirían a una ampliación y, finalmente, a una reestructuración de la mecánica. Por otro, un desarrollo clave en el ámbito de la astronomía.

En 1543 se publicó el modelo astronómico de Copérnico, en el cual es el Sol, y no la Tierra, el que ocupa el centro del universo. En un primer momento sólo unos pocos eruditos comprendieron su teoría, y la interpretaron como un método simplificado para determinar las configuraciones planetarias.

Sin embargo, al convertir a la Tierra en un planeta más, el sistema copernicano planteó enseguida problemas de índole física. ¿Por qué no pueden observarse los efectos mecánicos que cabría imaginar en una Tierra en movimiento? Una pregunta típica es, por ejemplo, la de por qué una piedra lanzada desde lo alto de una torre no choca contra el suelo al oeste de su base, pese a que la torre, mientras la piedra cae, ha debido de desplazarse una distancia considerable hacia el este como consecuencia de la rotación diaria de la Tierra.

Galileo se mostró enseguida interesado tanto por este tipo de problemas mecánicos como por el modelo copernicano en sí. Resulta, empero, inútil buscar en su obra algún

4. EN SU OBRA *DE RE METALLICA* (1556), Georg Agricola describe este pozo y su torno. En el eje hay acoplado un volante de inercia, con ayuda del cual, según Agricola, tres hombres pueden hacer el trabajo para el que normalmente se necesitarían cuatro. Los volantes de inercia estimularían las reflexiones de Galileo sobre los movimientos de rotación.



DE HARTMANN SCHEDEL, WETT CHRONIK, NUREMBERG, 1493 (*izquierda*); GEORG AGRICOLA, *DE RE METALLICA LIBRI XII*, 1556 (*derecha*)/SuW

Las ideas de Galileo superarían una y otra vez la frontera aristotélica entre la tierra y el cielo.

bosquejo de entidad de una mecánica de los movimientos celestes. En hilos de ideas aislados, dispersos, sí se ve que sus reflexiones chocaban inevitablemente con la frontera que separaba el cielo de la tierra y que, para franquearla, recurría a argumentos de naturaleza mecánica.

Del volante de inercia al movimiento de la esfera de las estrellas fijas

En la Biblioteca Nacional de Florencia se encuentra un manuscrito cuya cubierta lleva el título *De motu antiquiora,* algo así como "Viejas obras sobre el movimiento". Contiene varios escritos que, si bien nunca llegaron a publicarse, Galileo redactó probablemente hacia 1592, bien aún en Pisa o ya en su primera época de profesor en Padua.

En uno de ellos, Galileo aborda el problema del movimiento de rotación de una gran bola de mármol sobre un eje fijo. Parte de un análisis del movimiento basado en la prescripción aristotélica de distinguir entre movimientos naturales y movimientos violentos, y se pregunta a cuál de las dos clases de movimiento pertenece la rotación de la bola de mármol.

Según Aristóteles, los movimientos naturales son los que experimentan los cuerpos terrestres hacia su lugar de origen: los cuerpos pesados tienden intrínsecamente a dirigirse hacia el centro del universo, que en la cosmología aristotélica coincide con el centro de la Tierra. Los movimientos violentos son, por el contrario, aquellos que necesitan de un agente externo. En ausencia de este agente externo, los movimientos violentos acaban necesariamente en reposo.



5. EN LOS *DISCORSI*, GALILEO DESCRIBE cómo llevó a cabo las comprobaciones experimentales de su ley de caída de los cuerpos con ayuda de un plano inclinado. El plano inclinado también formaría parte de sus experimentos sobre balística. El dispositivo representado aquí para la demostración de la ley de caída de cuerpos es de principios del siglo XIX. Está inspirado en las descripciones de Galileo.

INSTITUTO Y MUSEO DE HISTORIA DE LA CIENCIA (IMSS), FLORENCIA, FRANCA PRINCIPE/*SuW*

Galileo argumentaría que, cuando en una bola de mármol que rota, el eje de rotación pasa por el centro de gravedad, la clasificación de movimientos de Aristóteles falla. Ni el centro de gravedad de la bola se dirige de una manera natural hacia el centro del universo, ni es tampoco forzado a moverse en otra dirección. Galileo concluye que la rotación no puede ser ni un movimiento natural ni uno violento. Por ese motivo, añade, y si se obvia el efecto del rozamiento, es imposible determinar si, una vez iniciado, el movimiento de rotación ha de prolongarse eternamente o si, por el contrario, acabará deteniéndose por sí mismo.

Si la masa de la bola no se distribuye uniformemente, su centro de gravedad ya no se encuentra sobre el eje de rotación horizontal que pasa por el centro de la bola. El centro de gravedad rota en torno a dicho eje, acercándose primero al centro del universo para después volver a alejarse del mismo. Según Galileo, aquí debe hablarse de un movimiento en el que se superponen una componente natural y otra violenta. Galileo llega a la conclusión de que, en tal caso, cuando se suprime la acción del agente externo que genera el movimiento, éste acaba necesariamente en reposo, incluso en ausencia total de rozamiento.

Sin embargo, según Galileo, nada de lo anterior se aplicaría al experimento hipotético en el que el eje de rotación de una bola inhomogénea pasase por el centro del universo: bajo tales condiciones, el centro de gravedad se movería siguiendo una trayectoria circular a una distancia fija del centro, siendo de nuevo imposible determinar si un movimiento de rotación tal se trata de un movimiento natural o de un movimiento violento.

Galileo no sería el único de la época en plantearse cuestiones relativas a la mecánica de los movimientos de rotación. Desde finales de la Edad Media, los ejes de transmisión de molinos y otras máquinas empezaron a dotarse de "volantes de inercia", pesados dispositivos rotatorios (*véase la figura 4*). Desde un punto de vista práctico, la utilidad de los mismos no ofrecía ninguna duda en aquella época. Sin embargo, desde un punto de vista teórico, resultaba difícil explicar por qué, al añadir un cuerpo muy pesado al que, a fin de cuentas, también había que mover, ciertos procesos se facilitaban considerablemente. La mecánica de rotación se convirtió así en un objeto de interés de la ciencia de principios de la Edad Moderna.

¿Qué tienen que ver las reflexiones de Galileo sobre la rotación de sólidos con la me-

cánica celeste? Galileo diría que "claramente, cometen un error aquellos que afirman que, si se añadiese una estrella al cielo, éste habría de moverse más lentamente, o incluso llegar a detenerse".

En noviembre de 1572 se observó una supernova en el cielo. Tycho Brahe, que fue uno de los primeros en verla, interpretó que se trataba de una nueva estrella. No todos se entusiasmaron tanto como Brahe con el descubrimiento: la creación de una nueva estrella ponía en entredicho la profunda convicción aristotélica en la inmutabilidad del firmamento. No ha de sorprender, por tanto, que en su defensa se creasen argumentos que supuestamente demostraban que aquello no había sido una nueva estrella.

Uno de dichos argumentos se basaba precisamente en la afirmación, tachada de falsa por Galileo, de que la aparición de una nueva estrella debería enlentecer el movimiento del cielo. Dado que esto último no se observaba, el fenómeno no pudo consistir, de acuerdo con el mencionado argumento, en la aparición de una nueva estrella. Este razonamiento se encuentra, entre otros, en los libros de Girolamo Borro y Francesco Buonamici, profesores de Galileo en la Universidad de Pisa.

¿En qué se basaba la afirmación de que la adición al cielo de una nueva estrella habría de enlentecer su movimiento? Según Galileo, en la experiencia de que, si alguien "que ha de mover una rueda añade un peso considerable a uno de los lados, o trabaja más o el movimiento se hace más lento".

En la imagen aristotélica del mundo es Dios, el Primer Motor Inmóvil, quien mueve la esfera de las estrellas fijas. La causa de los movimientos celestes es, por tanto, tan inmutable como Dios mismo. Si uno aplica al cielo la experiencia citada por Galileo, resulta evidente que la consecuencia de añadir una estrella al cielo es un movimiento más lento de la esfera de las estrellas fijas.

Pero se trata de una deducción errónea, ya que, continúa Galileo, "si la rueda rota en torno al centro del universo, ¿quién podría afirmar que el peso constituye un impedimento?". En la concepción aristotélica del mundo, el movimiento de la esfera de las estrellas fijas no sería análogo al movimiento de una bola sobre la superficie de la Tierra, sino a la rotación de una bola en torno al centro del universo.

La naturaleza de este tipo de movimiento es, de acuerdo con el experimento mental de Galileo, insensible a la adición de peso a la bola o, en su caso, a la aparición de una nueva estrella en el firmamento. La afirmación de que, al añadir una estrella a la esfera de las estrellas fijas, ésta habría de moverse más lentamente sería, por tanto, inválida, lo que a su vez anulaba también el argumento en contra de la aparición de una nueva estrella.

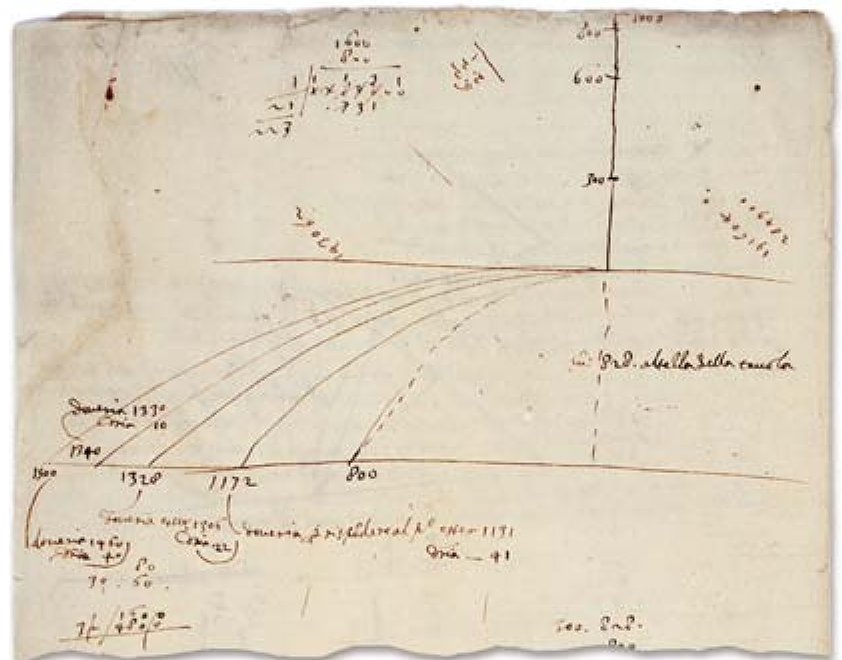
Galileo se sirve aquí de una analogía mecánica con el objeto de explicar el movimiento del cielo. Es evidente que esta analogía pertenece al argumento que Galileo recoge y al mismo tiempo corrige. Su encuentro con una mecánica celeste se presenta, por tanto, como una consecuencia inevitable del saber científico parcelado de la época, en cuyo marco tiene lugar el pensamiento de Galileo. Puede hablarse en términos similares del resto de los casos en los que Galileo empleó razonamientos mecánicos para responder a las cuestiones sobre los movimientos celestes.

Con su teoría de las mareas, Galileo creyó haber encontrado una demostración del movimiento de la Tierra.

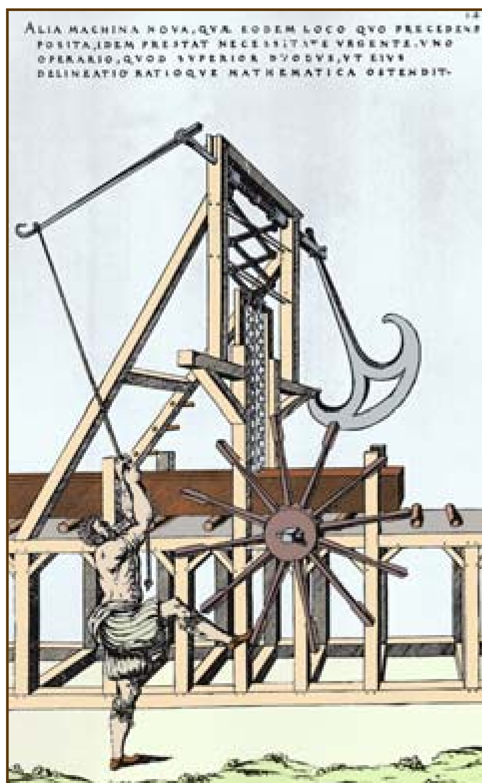
De las trayectorias balísticas al movimiento de los planetas

Algo más de diez años después, en uno de sus períodos más c reativos, Galileo experimentaba en el taller de su casa de Padua con pequeñas bolas de bronce. Las hacía caer desde diferentes alturas por un plano inclinado (*véase la figura 5*) y, mediante un segmento arqueado, dirigía la trayectoria de la bola hacia la superficie de una mesa, transformándose así el movimiento acelerado de caída en un movimiento horizontal de velocidad constante.

Al llegar al borde de la mesa, la bola salía despedida horizontalmente y caía al suelo, siguiendo una parábola. El lugar en que chocaba contra el suelo estaba tanto más lejos de la mesa cuanto mayor era su velocidad al abandonar el borde, lo que a su vez se correspondía con una mayor altura del punto en el que comenzaba su recorrido en el plano inclinado.



6. GALILEO ANOTO LAS MEDIDAS obtenidas en sus experimentos balísticos y las comparó con los valores que había calculado teóricamente. El experimento se convertiría en la base conceptual de su hipótesis cosmológica.



7. MUCHOS PENSADORES de la primera mitad del siglo XVII, Galileo entre ellos, se dedicaron al estudio de la mecánica del péndulo. Un gran péndulo es parte del mecanismo que acciona este aserrador.

JACOBUS BESSONUS, *THEATRUM INSTRUMENTORUM*, 1578/SuW

Galileo hacía variar el punto de partida de la bola y medía cómo esto afectaba al alcance final del lanzamiento.

Sabemos todo esto con tanta exactitud gracias a que Galileo hizo una representación esquemática de su experimento en una página de sus "Apuntes sobre el movimiento", que se conservan hoy como parte del manuscrito Ms. Gal. 72, depositado en la Biblioteca Nacional de Florencia. En esa página (*véase la figura 6*) anotó, además, los alcances de la trayectoria según los midió él mismo, así como los valores que esperaba obtener de acuerdo con sus suposiciones teóricas.

El experimento de Galileo se basa en su conocimiento sobre la forma de las trayectorias balísticas. Parte de determinadas suposiciones sobre la transición del movimiento de caída al movimiento horizontal. En primer lugar, el aumento de velocidad durante la caída debía estar de acuerdo con la ley de la caída de los cuerpos conjeturada por él mismo. En segundo lugar, presupone que la velocidad alcanzada por la bola permanece constante cuando la bola deja el plano inclinado y comienza a desplazarse horizontalmente. Y en tercer lugar, asume que los movimientos horizontales conservan constante, en ausencia de obstáculos, su velocidad inicial, es decir, transcurren de modo uniforme.

Sus razonamientos y conclusiones sobre el movimiento de proyectiles quedarían recogidos, como parte de su nueva teoría sobre el movimiento, en los *Discorsi* que publicó en 1638. Sus consideraciones al respecto pueden entenderse como una respuesta a los desafíos que los ingenieros de principios de la Edad Moderna plantearon con la mejora de las piezas de artillería que venía teniendo lugar desde finales de la Edad Media. Debido al mayor alcance conseguido con las armas, las cuestiones de balística cobrarían una importancia cada vez mayor.

¿Qué relación guardaban los experimentos balísticos con los problemas de la mecánica celeste? Una respuesta la podemos encontrar en su *Diálogo sobre los dos sistemas principales del mundo*, de 1632. En él presenta un modelo cosmológico que, como se verá, se basa exactamente en las mismas hipótesis que su experimento con las bolas de bronce.

La cosmología de Galileo parte de una versión simplificada del modelo heliocéntrico tomada del *Mysterium Cosmographicum* de Kepler, publicado en 1597. Según dicho modelo, las trayectorias de los planetas son círculos perfectos alrededor del Sol. Galileo toma también de aquí los datos astronómicos proporcionados por Kepler, esto es, los radios de las órbitas y los períodos de los planetas.

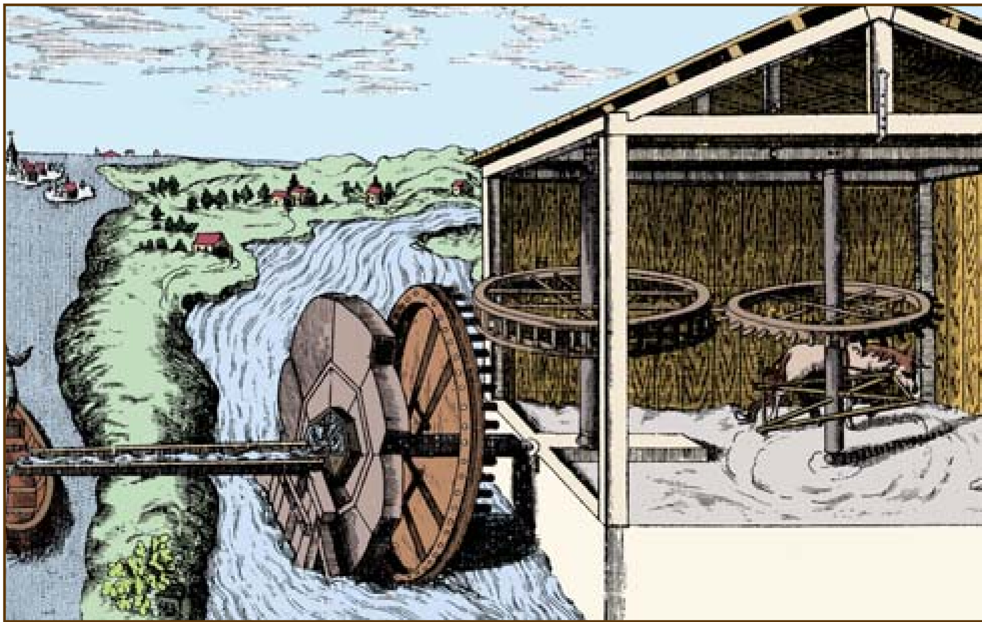
De acuerdo con la cosmología de Galileo, las trayectorias observadas resultan de lo siguiente: primeramente, los planetas habrían caído, a partir de determinada distancia, hacia sus órbitas; allí habrían mantenido su movimiento sobre las órbitas circulares correspondientes con la velocidad alcanzada en la caída. El poder explicativo de su hipótesis se funda en la suposición de que es posible encontrar un punto de partida común para el movimiento de caída de todos los planetas tal, que puedan reproducirse, por medio de su modelo, las velocidades orbitales proporcionadas por Kepler.

El razonamiento en el que se basa la hipótesis de Galileo se corresponde exactamente, desde un punto de vista conceptual, con el de sus experimentos sobre el movimiento de proyectiles. Del mismo modo que en dichos experimentos los cuerpos lanzados desde distintas alturas caen en una misma trayectoria horizontal a lo largo de la cual continúan moviéndose con diferentes velocidades, los planetas de la cosmología de Galileo habrían caído desde una misma altura para acabar en diferentes órbitas, a lo largo de las cuales continuarían moviéndose uniformemente con distintas velocidades.

Tanto en el *Diálogo* como en los *Discorsi* (es decir, con posterioridad a su condena por parte de la Inquisición), Galileo presenta sus hipótesis cosmológicas y afirma haber realizado cálculos fundamentados en sus tesis que "concuerdan espectacularmente" con las observaciones realizadas.

Resulta posible identificar tales cálculos en las anotaciones de Galileo. Muestran que, contrariamente a lo que él mismo afirmaba, no fue capaz de reproducir con exactitud a partir de sus hipótesis los datos que había sacado de Kepler. En cualquier caso, su modelo sí demuestra un acuerdo cualitativo con las observaciones astronómicas; por ejemplo, una mayor velocidad en las órbitas de los planetas más cercanos al Sol. Esta concordancia cualitativa dio pie a que Galileo publicase su hipótesis cosmológica, a pesar de que no estaba completamente elaborada.

De toda su obra, es probablemente en su hipótesis cosmológica donde Galileo supera con mayor claridad la barrera entre la física



8. UNA BARCA QUE ABASTECE DE AGUA DULCE a la laguna de Venecia se llena con un mecanismo de tracción de agua. Fue probablemente el vaivén del agua en un barco lo que sugirió a Galileo su teoría de las mareas.

VITTORIO ZONCA, *NOVO TEATRO DI MACHINE ET EDIFICII*, 1607/SuW

terrestre y la celeste. Al igual que en sus reflexiones sobre la rotación, vemos también aquí cómo se hace prácticamente inevitable aplicar argumentos mecánicos a los movimientos celestes, lo cual no es sino una consecuencia de las diferentes visiones conceptuales en que se desarrolla el pensamiento de Galileo.

Según la física aristotélica, una bola cae de manera natural por un plano inclinado. Por el contrario, el movimiento hacia arriba sólo puede realizarse de manera violenta. En el caso límite que representa un plano horizontal, Galileo presupone que no puede aplicarse ninguna de las dos clasificaciones anteriores y que, por lo tanto, una bola en estado de reposo ha de permanecer quieta, mientras que una ya en movimiento ha de continuar moviéndose. Esta hipótesis, en la que, entre otras cosas, también se basa la interpretación de Galileo de sus propios experimentos balísticos, parece anticipar el principio de inercia de la mecánica moderna.

Pero, ¿qué caracteriza a un plano horizontal? También para responder a esta pregunta se apoya Galileo en supuestos conceptuales aristotélicos. Un cuerpo sólo puede ser indiferente ante el reposo o el movimiento cuando ni se acerca al centro del mundo, ni se aleja de ahí. Lo que a pequeña escala parece un movimiento horizontal y plano, se revela, al pasar a una escala mayor, de acuerdo con la lógica aristotélica, como un movimiento circular. El razonamiento que permite pasar de un movimiento sobre un plano horizontal a una órbita circular es justamente el mismo que caracteriza la relación entre el experimento de Galileo y su cosmología.

La evolución de la teoría de Galileo sobre los proyectiles hasta llegar a una hipótesis cosmológica aparece, por tanto, como una consecuencia casi inevitable del subyacente sistema conceptual aristotélico. Sin embargo, lleva también a una generalización del principio de inercia que resulta problemática desde un punto de vista moderno. A partir de un movimiento uniforme y horizontal, Galileo no generaliza el concepto de inercia a movimientos rectilíneos en una dirección arbitraria, sino que, erróneamente, concluye que son los movimientos circulares los que pueden interpretarse como inerciales.

Del péndulo a las mareas

En los apuntes de Galileo sobre su teoría del movimiento podemos encontrar otro razonamiento más que, haciendo uso de argumentos mecánicos, franquea de nuevo la frontera entre el cielo y la tierra.

Galileo se imagina un gigantesco péndulo con una longitud igual al radio de la Tierra, y supone que un péndulo tal habría de ir de un extremo de su movimiento hasta el opuesto en exactamente seis horas. Haciendo uso de la ley del péndulo, que relaciona la longitud de éste con el período de sus oscilaciones, calculó en una de las páginas de sus manuscritos el tiempo que un péndulo de 16 varas florentinas, es decir, unos diez metros de largo, tardaría en hacer lo mismo.

Si bien no existen péndulos del tamaño de la Tierra, sí hay péndulos de diez metros de longitud: por ejemplo, los oscilantes candeleros que en tiempo de Galileo colgaban de los techos de catedrales y basílicas. El cálculo de Galileo trata de deducir una consecuencia observable (el período de oscilación de un péndulo de diez metros de longitud) a partir de la hipótesis de que un péndulo del tamaño

El autor

Jochen Büttner, del Instituto Max Planck de la Historia de la Ciencia, en Berlín, investiga los orígenes y mecanismos de la profunda reestructuración del saber en los siglos XVI y XVII.

de la Tierra oscila con un semiperíodo de seis horas.

Al igual que los cuerpos en rotación o las trayectorias balísticas, los péndulos formaban también parte de los problemas que la ciencia de principios de la Edad Moderna tenía que encarar, pues era objeto ya de diferentes aplicaciones técnicas. Así pues, en la primera mitad del siglo XVII había cada vez más estudiosos que se dedicaban a la búsqueda de una explicación de sus notables propiedades. Por ejemplo, el hecho de que, para pequeñas amplitudes de oscilación, las oscilaciones de un péndulo son aproximadamente isócronas; es decir, el período depende en muy poca medida de la amplitud máxima de oscilación. Este es el motivo de que resulte tan apropiado para medir el tiempo.

No es, por tanto, de extrañar que Galileo se dedicase al estudio de las propiedades mecánicas del péndulo. Hasta afirma haber sido el primero en percatarse de que los péndulos oscilan de manera isócrona. Son sus intentos por explicar dicha propiedad del péndulo, a cuya validez Galileo se atendría durante toda su vida, los que asentarían los fundamentos de su nueva teoría del movimiento.

Aquí surge de nuevo la pregunta acerca de la relación existente entre una mecánica celeste y las reflexiones de Galileo sobre los movimientos pendulares. En su *Diálogo* de 1632 propuso una nueva teoría sobre las mareas. Al respecto, sostiene que, cuando el agua contenida en un recipiente va y viene de un lado a otro, se comporta como "un peso suspendido de un hilo al que se ha apartado de su posición de reposo, es decir, de la vertical". Exactamente igual que un péndulo.

Galileo y su amigo Paolo Sarpi ya habían tenido tiempo atrás la idea de asociar las mareas a un movimiento de vaivén del agua contenida en "recipientes" de distinta forma y tamaño, que en este caso vendrían a ser las cuencas marinas. Les había parecido llamativo el hecho de que, cuando un barco atraca bruscamente, el agua de la cubierta fluya hacia la proa, y una vez se esté moviendo, siga oscilando hacia delante y hacia atrás durante largo tiempo.

La teoría de las mareas que se deriva de este patrón se compone de dos partes: por un lado, la manera en la que el agua en la cubierta del barco (o, en su caso, en una cuenca marina) continúa su movimiento, una vez iniciado. Este proceso depende esencialmente del sistema formado por el agua y el recipiente correspondiente. Por otro, dicho movimiento necesita de un agente externo que lo ponga en marcha; por ejemplo, el frenado del barco al atracar.

Como analogía mecánica del sistema formado por el agua y el recipiente, es evidente que el movimiento de un péndulo del tamaño de la Tierra ha de tener lugar con el mismo ciclo con el que se alternan bajamar y pleamar. Por eso Galileo supone que un péndulo del tamaño de la Tierra ha de tener un semiperíodo de seis horas. Y el período de oscilación de un péndulo de diez metros de longitud es ciertamente comparable con el que nuestro científico obtenía a partir de sus suposiciones y cálculos, aunque algo más corto: si bien los resultados empíricos no confirmaban su hipótesis, tampoco la desmentían completamente.

Sin embargo, en lo que respecta a la causa que origina y perpetúa el movimiento del gigantesco péndulo o, en este caso, del agua, la sola dimensión del fenómeno de las mareas apunta a una causa de proporciones cósmicas. Esta fue la causa que Galileo buscó y encontró en el sistema copernicano.

Según Copérnico, la Tierra lleva a cabo tres tipos de movimiento: uno diario alrededor de su propio eje, uno anual alrededor del Sol y finalmente un movimiento coniforme de su eje, también con periodicidad anual. A partir de la superposición de los dos primeros tipos de movimiento, Galileo deduce la existencia de las aceleraciones y deceleraciones que necesitaba para su modelo de explicación de las mareas.

9. ESTA IMAGEN ESTA TOMADA DE LA OBRA *Ragionamenti sopra la varietà dei flussi e riflussi*, en la que Nicolò Sagri exponía, en 1574, su teoría de las mareas. Según ésta, la bajamar y la pleamar se originaban a partir de una interacción calórica con la Luna. Para describir el movimiento del mar emplearía, como analogía mecánica, las oscilaciones del brazo de una balanza.



Dado que los sentidos de rotación de los movimientos diario y anual de la Tierra coinciden, sus velocidades, según Galileo, se suman en el lado de la Tierra que se encuentra más alejado del Sol. En el lado de la Tierra iluminado por el Sol, el comportamiento es el contrario. Entre estos dos puntos el agua del mar experimenta, respectivamente, una deceleración y una aceleración, de modo similar al agua en un barco que zarpa o atraca.

Las explicaciones de las mareas basadas en un influjo directo de la Luna serían explícitamente tachadas por Galileo de esotéricas. En realidad, tampoco estaba convencido de que el flujo y el reflujo tuvieran la misma periodicidad de medio día lunar a lo largo y ancho de todo el planeta. De acuerdo con su modelo del agua en un barco, Galileo creía que cada cuenca marina oscila con el período natural que le es propio conforme a los estímulos externos, cuyo período, según su teoría, sí era de veinticuatro horas.

Así concluía Galileo su teoría de las mareas, alcanzando con ello dos objetivos a la vez: en primer lugar, conseguía dar una explicación al misterioso fenómeno, ya que las mismas podían entenderse como el efecto mecánico de una Tierra en movimiento; y en segundo, el movimiento terrestre exigido por el sistema copernicano ya no se presentaba como algo absurdo, sino que se convertía en una condición indispensable de la aparición de las mareas.

En su *Diálogo sobre los dos sistemas principales del mundo* Galileo logró llevar a buen término una acrobacia sorprendente: por un lado, conseguía explicar por qué no aparecen los efectos mecánicos que, según los contrarios a las tesis copernicanas, debían de poder observarse en caso de que las mismas se correspondiesen con una realidad física. Por otro, hacía del doble movimiento de la Tierra la causa mecánica de las mareas, causa que no existiría en una Tierra en reposo. Con ello ofrecía su propia opinión acerca de la prueba irrevocable de la validez del sistema copernicano.

Galileo no fue de ningún modo el único en intentar encontrar una explicación a las mareas mediante una analogía mecánica. En el año 1574, Nicolò Sagri presentó una teoría en la que, en vez de un péndulo, emplearía una balanza como modelo mecánico responsable del flujo y reflujo del mar. Sagri, que rechazaba una visión heliocéntrica del mundo, propondría como causa del movimiento del mar una interacción calórica entre éste y la Luna (*véase la figura 9*).

Vemos así que a Galileo le resultó en su teoría de las mareas casi inevitable recurrir a un argumento mecánico para responder a preguntas relacionadas con el movimiento celeste. Por una parte, las mareas podían describirse mediante analogías mecánicas como la del péndulo o la balanza; por otra, era prácticamente imposible localizar la causa del fenómeno en un ámbito que no fuera el de la física celeste (constituyera ésta una interacción con la Luna, como en la propuesta de Sagri, o el doble movimiento de la Tierra en torno al Sol, como en el caso de Galileo, acérrimo defensor del modelo copernicano).

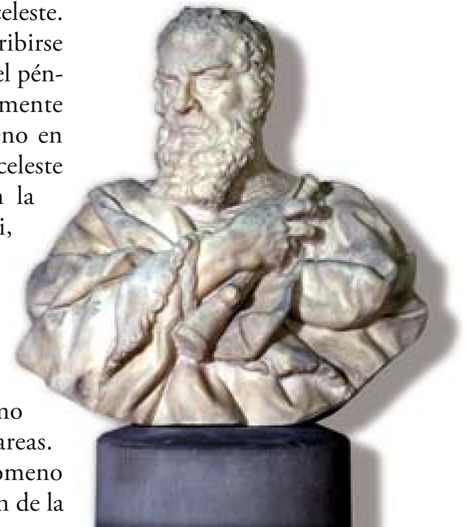
Si bien el sistema copernicano acabaría por imponerse, no pasaría lo mismo con la teoría de Galileo sobre las mareas. Newton daría una explicación del fenómeno como resultado de las fuerzas de atracción de la Luna, del Sol y sus movimientos relativos.

De Galileo a Newton

En la obra de Galileo no pueden encontrarse muchos argumentos mecánicos relativos a los movimientos celestes. Los tres ejemplos que hemos esbozado aquí representan probablemente sus reflexiones más detalladas al respecto; apenas hay más en su obra. En cualquiera de estos tres casos, la extensión del uso de razonamientos mecánicos al ámbito celeste no es tanto el resultado de una búsqueda sistemática de una mecánica celeste, cuanto una consecuencia difícilmente evitable de las estructuras cognitivas que fundamentaban el pensamiento de Galileo. No obstante, y por más que su aportación fuese en cierta medida modesta, los argumentos de Galileo contribuyeron a debilitar la barrera aristotélica que distinguía entre una física celeste y otra terrestre.

Al igual que Galileo, muchos otros pensadores de la época aportaron argumentos que impulsaron una imparable mecanización de la imagen del mundo. Poco tiempo después, Descartes, con un modelo del mundo basado en principios mecánicos, acabaría por franquear la frontera. No obstante, Descartes se quedaría tan lejos como Galileo de la elaboración de una teoría mecánica capaz de superar las predicciones de los modelos geométricos, profundamente diferentes, basados en una tradición milenaria de observaciones astronómicas.

Tendría que pasar casi medio siglo hasta que Newton comprendiese que los cuerpos celestes se mueven siguiendo las mismas leyes que dictan cómo cae una manzana de un árbol. Sólo esta manera de entender el fenómeno posibilitaría la creación de una teoría mecánica capaz de reproducir y predecir los movimientos del cielo con la exactitud con que lo hacían los modelos geométricos de la astronomía.



10. ESTE BUSTO DE CARLO MARCELLINI (1676) muestra a Galileo con su telescopio. Los argumentos con que Galileo explicaba los movimientos celestes no se fundaban sólo en sus nuevas observaciones telescópicas, sino en los inmensos conocimientos astronómicos ya existentes en su tiempo.

IMSS/CARLO MARCELLINI, 1676/*SuW*

Bibliografía complementaria

DIE MECHANISIERUNG DES WELTBILDES. E. J. Dijksterhuis. Springer, 1956.

LA REVOLUCION COPERNICANA. T. S. Kuhn. Editorial Ariel, 1996.

KOSMOLOGIE. J. Büttner y J. Renn en *Kosmologie und Evolution: Woher die Welt? Woher der Mensch?*, dirigido por S. Borrmann y G. Rager, 2009.

La teoría de cuerdas y el LHC

La teoría de cuerdas es la candidata más firme a teoría unificada de las interacciones de la naturaleza. El gran colisionador de hadrones, LHC, de Ginebra, podría dar importante información experimental sobre su validez

Luis E. Ibáñez

CONCEPTOS BASICOS

- Según la teoría de cuerdas, las partículas fundamentales del modelo estándar serían vibraciones de energía de cuerdas abiertas de muy pequeño tamaño, mientras que la gravitación surgiría de las vibraciones de cuerdas cerradas. ¿Existe alguna posibilidad de comprobar esta hipótesis en un acelerador de partículas?
- La consistencia matemática de la teoría de cuerdas requiere que cumpla una propiedad, la supersimetría, que despeja también problemas del modelo estándar relativos a la partícula de Higgs, la que les proporciona la masa a las demás partículas.
- La supersimetría predice la existencia de una serie de partículas; entre ellas, los neutralinos, cuya existencia se manifestaría por una aparente no conservación de la energía. Su detección en el nuevo acelerador LHC sería un indicio de la validez de la teoría de cuerdas.

La búsqueda de los constituyentes últimos de la materia ha significado una de las aventuras intelectuales más importantes del siglo XX. En el pasado siglo se construyeron los tres pilares básicos de la física moderna: la mecánica cuántica, la teoría de la relatividad y la gravitación de Einstein. Se descubrió también la existencia de cuatro interacciones fundamentales en la naturaleza: fuerzas nucleares, débiles, electromagnéticas y gravitatorias.

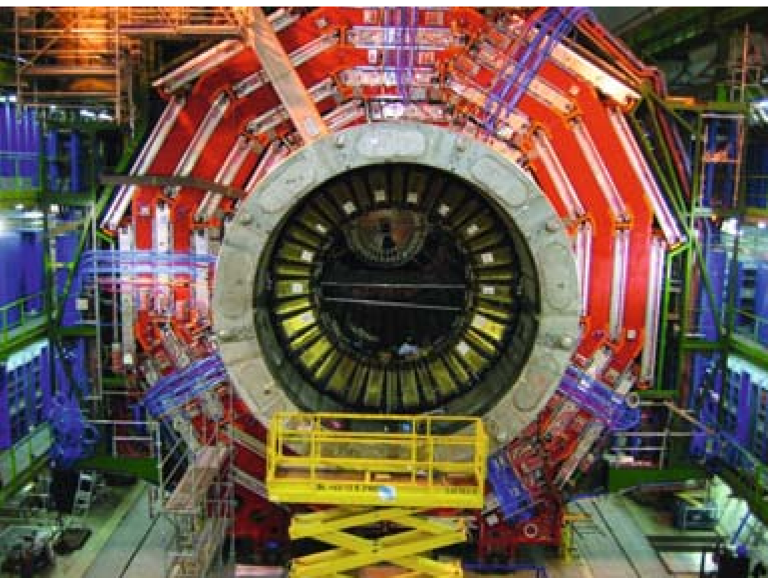
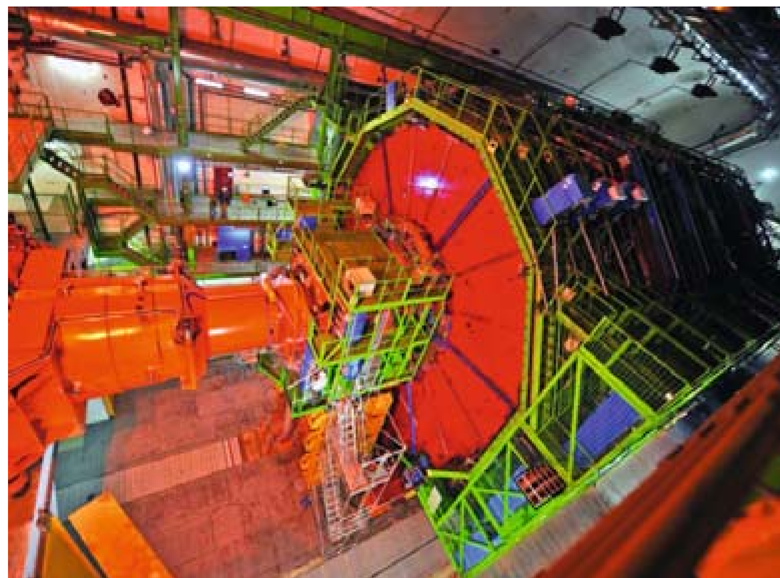
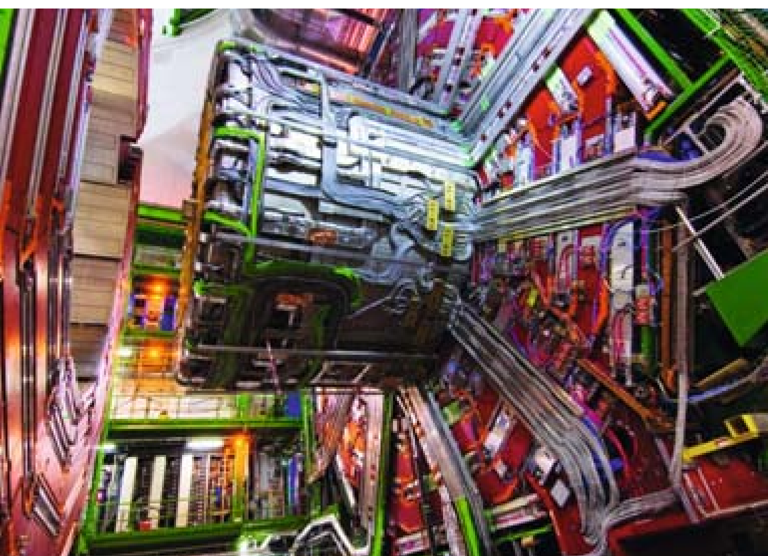
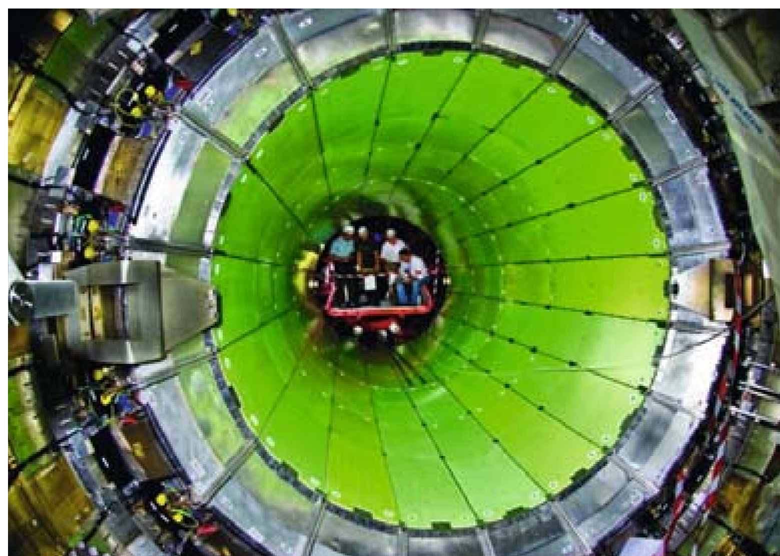
El denominado modelo estándar de la física de partículas describe de forma satisfactoria, combinando mecánica cuántica y relatividad, todos los resultados experimentales relativos a las interacciones nucleares, débiles y electromagnéticas. Y no sólo eso. En cosmología, la teoría de la gran explosión, basada en la gravitación de Einstein, permite entender un buen número de las propiedades observadas en el universo.

Lo que ya sabemos

Recordemos que la materia está constituida por partículas llamadas fermiones, que son de dos tipos, quarks (que interaccionan fuertemente) y leptones (que no interaccionan fuertemente). La materia usual, la que conocemos en la experiencia cotidiana, está constituida exclusivamente por dos tipos de quarks, *arriba* y *abajo,* y dos tipos de leptones: el electrón y su neutrino ν_e. Todo lo que observamos (incluyéndonos nosotros mismos) está formado por esos ingredientes. Estas cuatro partículas forman lo que se llama la "primera generación" de quarks y leptones. Además, existe una segunda generación (los quarks *c* y *s*; el muón y su neutrino ν_μ) y una tercera (quarks *t* y *b*; el τ y su neutrino ν_τ). Estas dos últimas generaciones son partículas inestables y sólo se han detectado por producción en aceleradores, o bien (algunas de ellas) en rayos cósmicos que chocan contra la Tierra.

De resultados obtenidos en aceleradores o de tipo cosmológico parece seguirse que sólo existen estas tres generaciones de partículas. Además, se sabe que las tres generaciones son elementales en el sentido de que no están compuestas por partículas más fundamentales, al menos según cabe discernir con la precisión de los aceleradores actuales. Estos componentes fundamentales de la materia interaccionan por el intercambio de los bosones intermediarios. El más conocido de ellos es el fotón, que media la interacción electromagnética, mientras que la interacción fuerte o nuclear es mediada por los "gluones". Finalmente los bosones W, Z son los causantes de la fuerza débil. A estos tres tipos de bosones intermediarios hay que añadir el gravitón, que es el causante de las interacciones gravitacionales.

Decíamos que sólo hay cuatro interacciones fundamentales en la naturaleza. Sin embargo, esto no es del todo cierto. Si así fuera, el modelo estándar describiría un universo muy poco parecido a lo observado (de hecho, no estaría-

mos aquí para poder contemplarlo). El modelo estándar incluye una nueva partícula vital para que las partículas tengan masas no nulas, el llamado bosón de Higgs, *H*. La peculiaridad de esta partícula es que tiene un efecto de frenado sobre todas las partículas; sus efectos se extienden por todo el espacio, dando lugar a la inercia o masa de todas ellas. La existencia de esta partícula no ha sido verificada todavía experimentalmente. Su búsqueda es uno de los motivos principales para el experimento LHC en el CERN, que está previsto que empiece a funcionar a finales de este año.

Lo que queremos saber

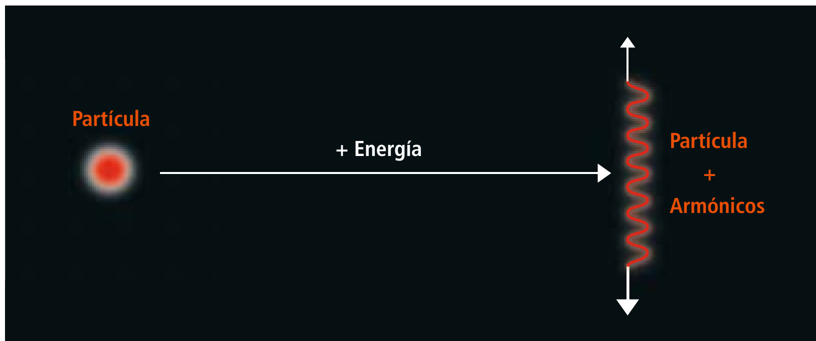
A pesar del éxito del modelo estándar en su explicación del universo observado, quedan muchas preguntas sin respuesta. La misma estructura del modelo estándar es un poco chocante: ¿por qué existen tres generaciones de quarks y leptones? Si con la primera generación basta para construir toda la materia observada, ¿por qué tal dispendio por parte de la naturaleza? ¿Por qué hay cuatro interacciones fundamentales en la naturaleza y no más o menos? ¿Y por qué unas son mucho más fuertes que otras? ¿Cuál es el origen de este sector extraño de la teoría, el bosón de Higgs, necesario para la generación de las masas y de naturaleza tan especial?

E incluso cuestiones más básicas como: ¿Por qué existen tres dimensiones espaciales y una temporal, y no más o menos? ¿Es el espaciotiempo un concepto fundamental de la teoría o un concepto derivado?

A todas estas y otras muchas preguntas se suma uno de los problemas que se ha revelado más difícil de resolver. Mientras que para las interacciones fuertes, débiles y electromagnéticas existe un formalismo relativista y cuántico a la vez (la llamada teoría cuántica de campos), no acontece así con la gravitación. A fecha de

1. SE SUELE SUPONER que la teoría de cuerdas no se podrá comprobar en un acelerador de partículas porque las energías a que la estructura de cuerdas de la materia se manifestaría son demasiado altas. Si se cumpliesen ciertas condiciones, sin embargo, caerían quizá dentro de lo que el nuevo Gran Acelerador de Hadrones (LHC) del CERN alcanzará. Pero aunque no fuera así, el descubrimiento de una nueva clase de partículas, las partículas supersimétricas, respaldaría en parte la validez de la teoría de cuerdas. En estas fotografías se ve uno de los detectores del LHC, el Solenoide Compacto de Muones.

CMS-CERN



2. AL COMUNICAR UNA ENERGIA MUY GRANDE a una partícula aparentemente puntual se revelaría su estructura de cuerda. Las vibraciones más ligeras corresponden a la partícula, mientras que las vibraciones de mayor frecuencia, los armónicos, tienen una masa muy grande y no son observables a bajas energías.

hoy, no existe una teoría cuántica de la gravitación coherente en todos sus extremos.

Efectivamente, a diferencia de las otras tres interacciones fundamentales, la teoría de la gravitación presenta inconsistencias en el nivel cuántico. Cálculos en teoría cuántica de campos que involucran la gravitación dan resultados numéricamente infinitos de difícil interpretación física. Se dice que la teoría es "no renormalizable". Este problema parece necesitar una revisión de algunos puntos de vista básicos de la física del siglo xx. Muchos piensan que hay que abandonar la idea de que los constituyentes fundamentales de la materia son partículas carentes de estructura interna. Es el carácter estrictamente puntual que la teoría supone para las partículas lo que parece dar lugar a los infinitos. De esta idea fundamental parten las teorías de cuerdas.

Por qué las cuerdas

Las teorías de cuerdas tienen como premisa que, a muy altas energías, las partículas no son puntuales, sino que tienen estructura de cuerda. Para 'estirar' los extremos de la cuerda y ver la estructura extensa de una partícula se necesitaría una enorme energía. Las partículas observadas corresponderían a los modos de vibración más ligeros de la cuerda, que son los observados experimentalmente. En este esquema hay potencialmente una total unificación: todas las partículas son diferentes "notas" de un solo "instrumento", la cuerda.

Una de las propiedades más interesantes de la teoría de cuerdas es que predice la existencia de una partícula, de un bosón intermediario sin masa que se acopla universalmente a toda forma de materia: el gravitón. Se puede decir que la consistencia de la teoría requiere la existencia de la gravitación. Por otra parte, mientras que las partículas del modelo estándar se asocian con los modos más ligeros de cuerdas abiertas, el gravitón aparece como el estado de vibración más ligero de la cuerda cerrada.

Otra propiedad a resaltar es que el carácter extenso (no puntual) de las cuerdas hace que desaparezcan los infinitos cuando se combinan gravitación y mecánica cuántica. Todos los cálculos en la teoría dan resultados finitos. Se trata del aspecto más interesante de la teoría: las de cuerdas son las primeras teorías encontradas que compatibilizan en principio mecánica cuántica y gravitación. Para ello se requiere que las cuerdas gocen de una propiedad, la de supersimetría, que da nombre a las "teorías de supercuerdas"; de la propiedad en cuestión nos ocuparemos más adelante.

Hay un ingrediente bastante exótico en la teoría de cuerdas. Se define de forma natural con seis dimensiones espaciales extra. Es decir, requiere que haya en principio nueve dimensiones espaciales y una temporal. La idea de la posible existencia de dimensiones físicas adicionales no constituye ninguna novedad. Propuesta en 1921 por Teodoro Kaluza, fue elaborada por Oscar Klein en 1926. ¿Por qué no se ha visto hasta ahora la existencia de dimensiones extra?

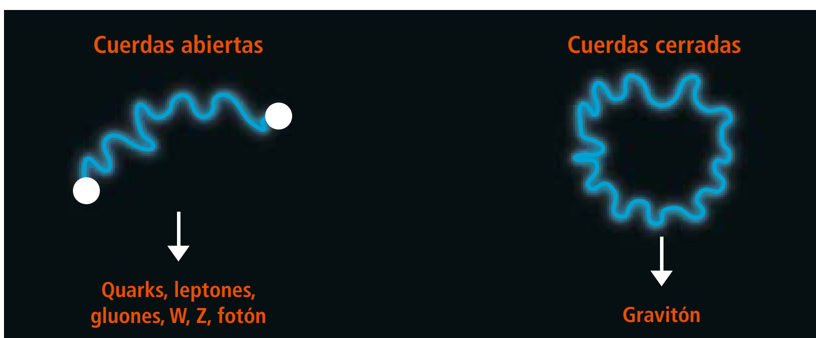
De acuerdo con la explicación de Kaluza y Klein, las dimensiones extra están curvadas sobre sí mismas en un círculo de radio R extremadamente pequeño. En tal caso, las partículas habituales serían las únicas que observaríamos experimentalmente en la vida corriente. Por otra parte, existirían réplicas de las partículas habituales que tendrían una masa más alta, dada por n/R, con n cualquier número entero positivo. Al ser el radio R de las dimensiones adicionales tan pequeño, dichas réplicas tendrían una masa muy, muy grande y, por lo tanto, no resultaría posible producirlas en los aceleradores existentes.

En el caso de la teoría de cuerdas, tenemos seis dimensiones extra cuya geometría es bastante más complicada que seis círculos. En general, si queremos que la teoría se parezca a bajas energías lo más posible al mundo observado, las seis dimensiones adicionales deben de corresponder a espacios con ciertas propiedades matemáticas muy especiales, que no describiremos aquí.

Escalas de energía

Es conveniente recordar las unidades de energía que estamos considerando. Una unidad

3. LAS VIBRACIONES MENOS ENERGETICAS de las cuerdas abiertas dan lugar a la materia habitual: quarks, leptones y bosones intermediarios. Las vibraciones de las cuerdas cerradas sobre sí mismas dan lugar al gravitón, es decir, a la interacción gravitacional.



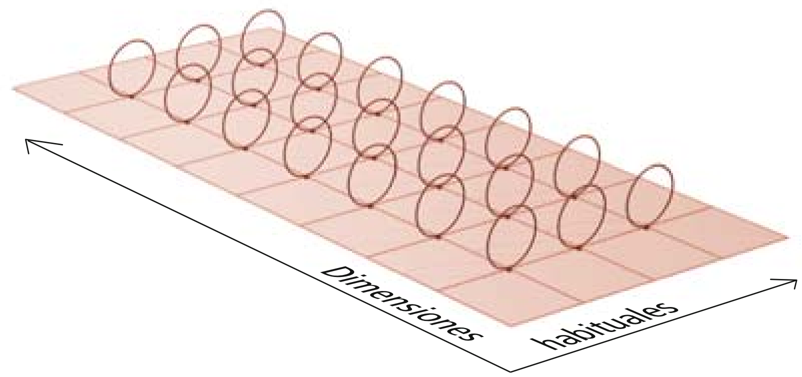
LUIS E. IBAÑEZ

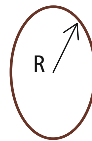
de energía habitual en la física de partículas elementales es el GeV (gigaelectronvolt). La teoría de la relatividad nos dice que hay una relación entre masa y energía, y que masa y energía se pueden transformar una en otra. Es consecuencia de la relación de Einstein, $E = mc^2$, donde E es la energía de una partícula, m su masa y c la velocidad de la luz. Así, una energía de un GeV correspondería a la energía que se obtendría en un proceso (imaginario) en el que un átomo de hidrógeno se desintegrase en pura energía. La energía que será capaz de concentrar el acelerador LHC en cada interacción dentro del detector es del orden de 10^4 GeV.

Volviendo a la teoría de cuerdas, hay dos escalas de energía fundamentales en la teoría: la escala de la cuerda M_{cuerda} y la de las dimensiones extra M_{KK}. La primera mide la escala por encima de la cual la estructura extensa de la cuerda se revela; la segunda, la energía necesaria para percibir la existencia de dimensiones extra. El cociente entre escalas está relacionado con la constante de la gravitación de Newton. Joel Scherk y John Schwarz, los primeros —en 1974— en considerar las cuerdas para una teoría unificada, supusieron que ambas escalas de energía eran iguales; era la elección más natural. Si es así, la escala de la cuerda será del orden de 10^{18} GeV, unos mil billones de veces mayor que las energías que obtendremos en el acelerador LHC. Por lo tanto, la teoría de cuerdas no se podría comprobar de manera directa en aceleradores presentes o futuros.

Sin embargo, Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos y Gia Dvali demostraron en 1998 que la escala de la cuerda M_{cuerda} puede ser en principio relativamente baja, incluso accesible al acelerador LHC [*véase* "Nuevas dimensiones para otros universos", por Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos y Gia Dvali; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 2000]. Se tendría un valor de M_{cuerda} tan bajo si la escala M_{KK} de las dimensiones extra fuese aún muchísimo más baja, del orden de 100.000 veces menor que M_{cuerda}, es decir, del orden de unos 0,01 GeV, la centésima parte de la energía correspondiente a la masa de un átomo de hidrógeno.

Una escala para las dimensiones extra tan baja parece incompatible con los experimentos, pues las réplicas de Kaluza-Klein de las partículas elementales usuales deberían haber sido observadas experimentalmente, si su masa fuese más pequeña que la de un átomo de hidrógeno. ¿Cómo sería posible que las réplicas de Kaluza-Klein del modelo estándar no se hubiesen observado ya en los experimentos? Joe Polchinski señaló, en 1995, que en la teoría





4. ESQUEMA DE UN ESPACIO CON UNA QUINTA DIMENSION. En cada punto de las dimensiones habituales hay otra dirección posible, correspondiente a una quinta dimensión más allá de las tres dimensiones espaciales habituales y el tiempo. Esta quinta dimensión está curvada sobre sí misma en un círculo de radio *R* de tamaño extraordinariamente pequeño, lo cual hace a esta dimensión invisible. El tamaño de la dimensión extra es mucho más pequeño que las distancias exploradas en los aceleradores hasta ahora existentes.

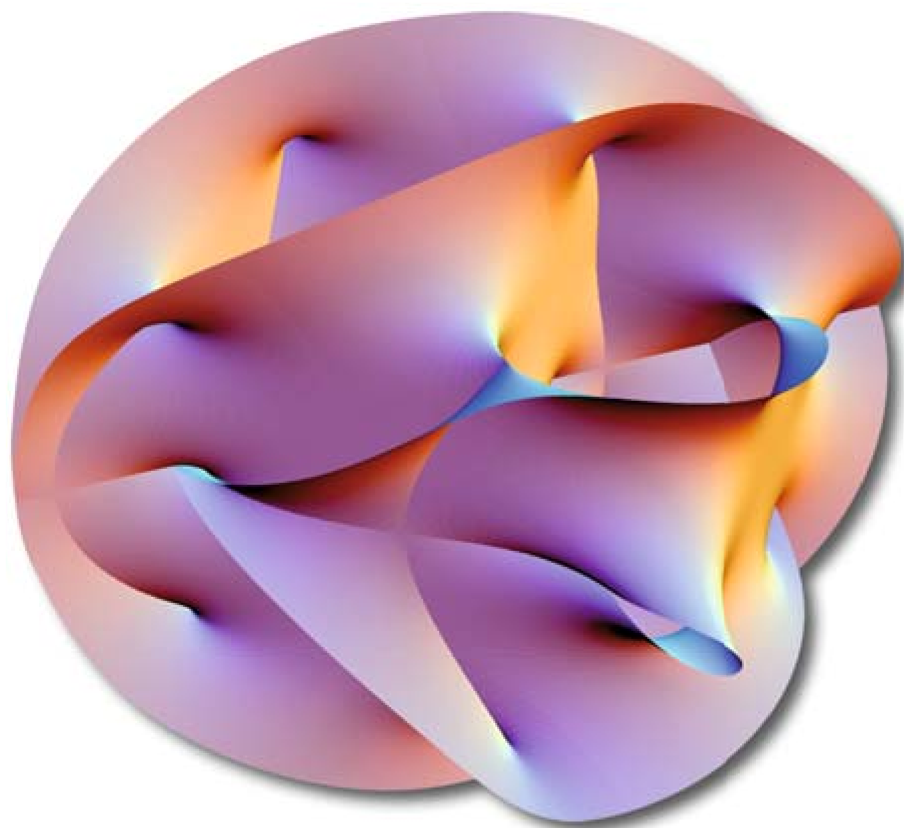
LUIS E. IBAÑEZ

de cuerdas las partículas del modelo estándar no siempre tienen réplicas de Kaluza-Klein, aunque haya dimensiones extra.

La idea es que en la teoría de cuerdas las partículas habituales (quarks, leptones, etcétera, pero no el gravitón) pueden existir tan sólo confinadas en un subespacio más pequeño que el total de 9 + 1 dimensiones en que se define la teoría. A esos subespacios en los que se ven obligadas a vivir por razones dinámicas se les llama 'Dp-branas'. Estos subespacios tienen dimensión igual a $p + 1$ (p dimensiones espaciales y una temporal), de tal manera que en la situación más sencilla se podría asociar el universo observado a una D3-brana. De esta manera, las partículas del modelo estándar no tendrían réplicas de Kaluza-Klein, mientras que el sector gravitacional sí las tendría. Existe entonces, en principio, la posibilidad de producir réplicas de Kaluza-Klein del gravitón en aceleradores de partículas como el LHC, como luego comentaremos.

La forma de las otras dimensiones

La teoría de cuerdas nos da una solución para el viejo problema de hacer compatible la teoría de la gravitación con la mecánica cuántica. Cabe ahora preguntarse si será capaz de describir correctamente las otras tres interacciones de la naturaleza dadas por el modelo estándar. Para que eso ocurra, el número de dimensiones espacio-temporales debe ser el correcto. Como decíamos, la teoría de cuerdas está formulada de forma natural en diez dimensiones y para



5. SEGUN LA TEORIA DE CUERDAS, el espacio no sólo tiene las cuatro dimensiones ordinarias, sino otras seis, curvadas, eso sí, sobre sí mismas de modo que nos resulten inaccesibles. De la manera en que se curven depende el número partículas elementales y la naturaleza de las interacciones físicas. La ilustración muestra una sección bidimensional proyectada en tres dimensiones de un espacio de Calabi Yau de seis dimensiones. La forma de las seis dimensiones adicionales se describe mediante ese tipo de objetos matemáticos.

WIKIPEDIA (LUNCH, BASADO EN LA DESCRIPCION DE ANDREW HANSON)

hacer contacto con las cuatro observadas en la vida diaria las seis dimensiones extra deben hallarse curvadas sobre sí mismas, con un tamaño diminuto. La idea es que existe un proceso dinámico denominado "compactificación" en el cual estas seis dimensiones extra se contraen y se hacen diminutas y prácticamente inaccesibles.

Sin embargo, y a pesar de esa aparente inaccesibilidad, la estructura de las seis dimensiones extra, su forma y geometría, tiene directas implicaciones físicas. Su geometría determina, por ejemplo, el número de generaciones de quarks y leptones. Vimos que hay tres generaciones de quarks y leptones en la naturaleza. La teoría de cuerdas nos da una explicación de por qué puede existir más de una generación: es una consecuencia de la estructura de las dimensiones extra. Otras propiedades físicas, como el número y forma de las interacciones fundamentales, así como los valores de las masas de los quarks y leptones, dependen también de dicha estructura.

Durante los últimos veinte años se han venido investigando soluciones —geometrías para las dimensiones extra— que sean coherentes con las características fundamentales del modelo estándar. Es lo que se ha dado en llamar fenomenología de la teoría de cuerdas. Se han ido descubriendo nuevas formas de compactificar las seis dimensiones extra. Con ello se han ido obteniendo soluciones de la teoría más y más cercanas a las propiedades del modelo estándar. Se trata de un programa de investigación mundial que tiene algún parecido con la exploración de la geografía de la Tierra durante los siglos XV al XVIII. El objeto de la exploración es ahora las seis dimensiones adicionales; las naves que permiten la exploración, la consistencia matemática y el acuerdo con la estructura observada del modelo estándar.

Para hacer contacto con las partículas observadas del modelo estándar, las diferentes vibraciones de la cuerda corresponden a partículas distintas. La mayoría de dichas vibraciones corresponden a partículas con masas muy grandes, del orden de M_{cuerda}. Tales partículas no pueden ser identificadas con los quarks y leptones observados, de masas mucho menores. Las partículas físicas corresponden a vibraciones de masa nula, de tal forma que en primera aproximación todas las partículas del modelo estándar aparecerían con masa nula. Sin embargo, entre las vibraciones sin masa de la cuerda debe de existir una correspondiente al bosón de Higgs, que es el que dará lugar a las masas observadas para todos los quarks y leptones, como en la descripción habitual del modelo estándar.

Aligerar el Higgs

Aquí reaparece un viejo problema, al que se ha venido en llamar el problema de las jerarquías de escala. Estriba en que la partícula de Higgs tiende a adquirir, debido a correcciones cuánticas, una masa enorme. Esta masa imponente sale de la probabilidad cuántica de que el Higgs se transforme en un par de partículas del modelo estándar en un tiempo infinitesimal, para volver a convertirse en el Higgs inicial. Si el bosón de Higgs tiene una masa muy, muy grande, desaparece a todos los efectos de la teoría y no puede, pues, ser el origen de todas las masas observadas. Nos referimos al problema de la jerarquía de escala, llamado así porque sin un bosón de Higgs no entenderíamos cómo se genera la escala de masas de las partículas.

Una de las posibilidades más atractivas para solucionar el problema consiste en crear una extensión del modelo estándar, capaz de contener una nueva simetría: la supersimetría.

Se trata de una simetría que asocia a cada bosón un nuevo fermión y a cada fermión un nuevo bosón. Así, si existe el fotón debe existir el fotino, y el electrón ha de tener un compañero supersimétrico, el selectrón. El bosón de Higgs presenta un compañero fermiónico, el higgsino, y así sucesivamente. Hay, pues, en la teoría igual número de fermiones y bosones.

Si ahora volvemos al cálculo de las correcciones cuánticas a la masa del Higgs, deberemos incluir en dicho cálculo la contribución de las nuevas partículas aducidas. Lo interesante

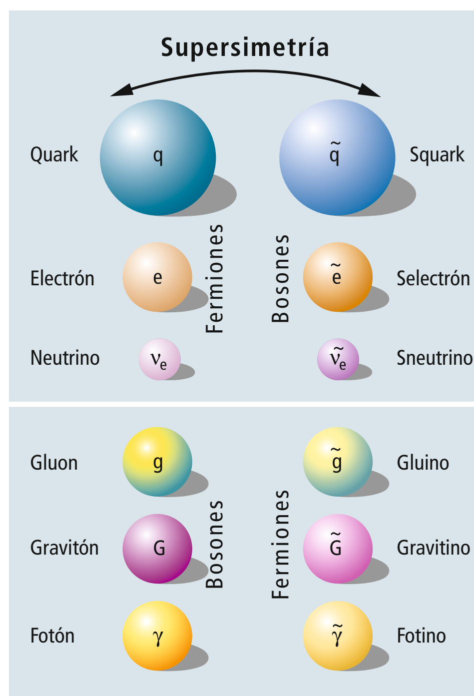
es que un fermión (por ejemplo, un electrón) y su compañero (el selectrón) contribuyen con la misma cantidad, aunque con signo opuesto, a la masa del Higgs, de manera que hay una cancelación total de las correcciones cuánticas de ésta y el problema de la jerarquía de escalas queda resuelto de una forma elegante: el Higgs permanece ligero y puede así dar masa a todas las partículas elementales.

Dentro de la teoría de cuerdas, esto quiere decir que debemos restringirnos a compactificaciones que tengan esta propiedad de supersimetría, de tal forma que las vibraciones de masa nula de la cuerda deben incluir no sólo las partículas del modelo estándar, sino también sus compañeras supersimétricas (squarks, gluinos, etcétera).

S-partículas

Un punto importante: para que el mecanismo de protección que la supersimetría da a la partícula de Higgs sea operativo, es necesario que las nuevas partículas supersimétricas tengan una masa no mucho mayor que la masa del Higgs. Por otra parte, sabemos que la partícula de Higgs ha de poseer una masa del orden de la que el acelerador LHC es capaz de proporcionar. De esa forma, si la supersimetría es una idea correcta, el LHC deberá ser capaz de producir partículas supersimétricas.

En el LHC colisionarán protones a alta energía y, si existen, los squarks se producirán a pares. Dichos squarks se desintegrarían cada uno en un quark y un neutralino (una mezcla de fotino y de higgsino) y, aparte de otras partículas no relevantes en el proceso, al final se observarían dos chorros (*jets*) de partículas provenientes de los quarks y la no conservación (sólo aparente) de la energía. Esta aparente no conservación se debería a los neutralinos, que interaccionan muy débilmente y no serían vistos, pues, en los detectores. Este tipo de señales experimentales se cuenta entre las que se buscarán con mayor interés en el acelerador LHC, tras su puesta en funcionamiento en 2009.

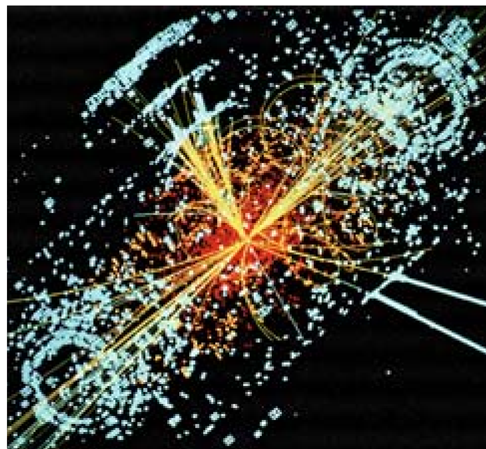


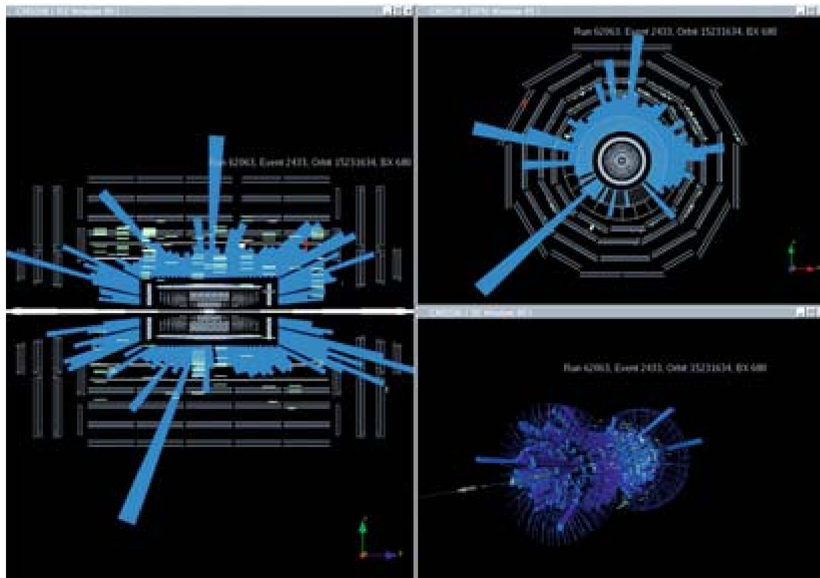
6. LA SUPERSIMETRÍA asocia a cada fermión —componente de la materia— del modelo estándar un bosón no incluido en el modelo estándar, y a cada bosón —transmisor de fuerza—, un fermión. El LHC podrá quizá descubrir esas "partículas supersimétricas", hasta ahora sólo hipotéticas.

Hay otra interesante consecuencia de la supersimetría. La teoría predice la existencia de una nueva partícula estable en la naturaleza (además del protón y el electrón), los neutralinos precisamente. Los cálculos establecen que podrían darse en el universo en una cantidad comparable con la de materia oscura necesaria para explicar los datos astrofísicos y cosmológicos. De manera que, si estas ideas son correctas, el LHC será capaz también de producir los componentes elementales de la materia oscura del universo.

Los físicos están pendientes de la respuesta que el LHC va a dar a la pregunta de si la

7. SIMULACION de las trayectorias y energías de las partículas que el detector CMS observaría en una de las formas en que podría generarse la partícula de Higgs en el LHC (*abajo a la izquierda*). Una de las primeras imágenes tomadas por el Solenoide Compacto de Muones, en septiembre de 2008, cuando se envió por el acelerador un haz de protones de prueba hacia un blanco (*derecha*).





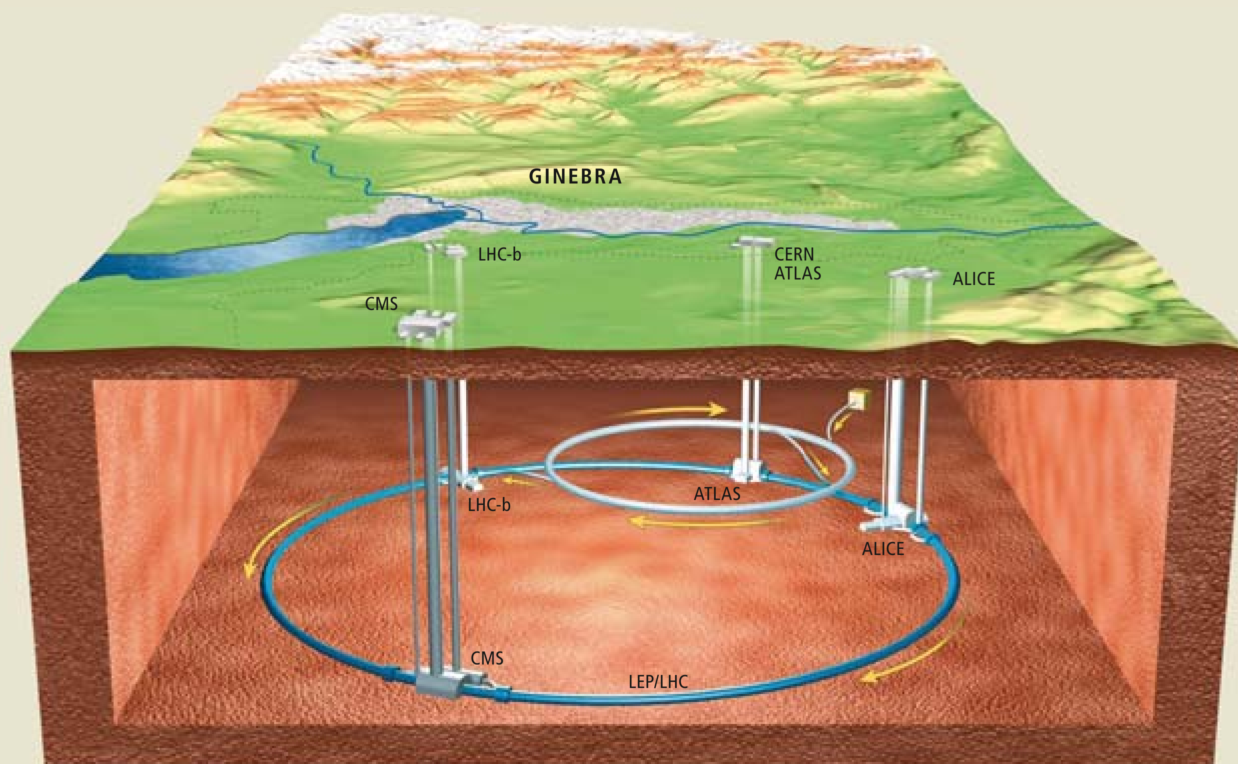
CERN (*abajo, izquierda*); CMS-CERN (*abajo, derecha*)

EL GRAN COLISIONADOR DE PARTICULAS LHC

Las herramientas imprescindibles para el estudio de la estructura de la materia a distancias subátomicas son los aceleradores de partículas. En los colisionadores, una clase de aceleradores, chocan a enormes velocidades, cercanas a la de la luz, haces de partículas elementales que viajan en direcciones opuestas. Se las hace colisionar en determinados puntos, donde se concentra así una enorme cantidad de energía; alrededor de dichos puntos se construyen detectores capaces de descifrar y medir las nuevas partículas creadas en los choques. Según la ecuación de Einstein ($E = mc^2$), la energía E puede transformarse en creación de nuevas partículas de masa m; dichas partículas son las estudiadas por los detectores. En este tipo de experimentos la energía se mide en GeV (gigaelectronvolt). Un GeV es aproximadamente la energía que se obtendría en un proceso (ideal) en el que un átomo de hidrógeno se transformase en energía.

El colisionador LHC (Large Hadron Collider) del CERN (Ginebra) será capaz de obtener colisiones con unos 14.000 GeV, valor unas diez veces mayor que la de aceleradores anteriores. El acelerador se halla instalado en un túnel circular de alrededor de 27 km de circunferencia a unos cien metros de profundidad, en la frontera entre Francia y Suiza, cerca de Ginebra. Como indica la figura, otro acelerador más pequeño (llamado SPS) inyecta protones en el LHC, que acelera haces de éstos en direcciones contrarias.

Los haces circulan por tubos de alto vacío (*a la derecha*) y la aceleración se obtiene mediante enormes campos magnéticos creados por imanes superconductores mantenidos a 1,7 grados kelvin (cerca del cero absoluto de temperaturas) para que puedan funcionar. A los haces de protones se les hace chocar en cuatro áreas experimentales subterráneas donde hay situados detectores de partículas del tamaño de edificios de seis plantas. Dichos detectores llevan por nombres ATLAS, CMS (*inserto, a la derecha*), LHC-b y ALICE; cada uno de ellos ha sido construido por centenares de físicos e ingenieros de todo el mundo, organizados en colaboraciones internacionales. Entre los objetivos fundamentales del LHC se cuenta la búsqueda del bosón de Higgs y de las partículas supersimétricas.

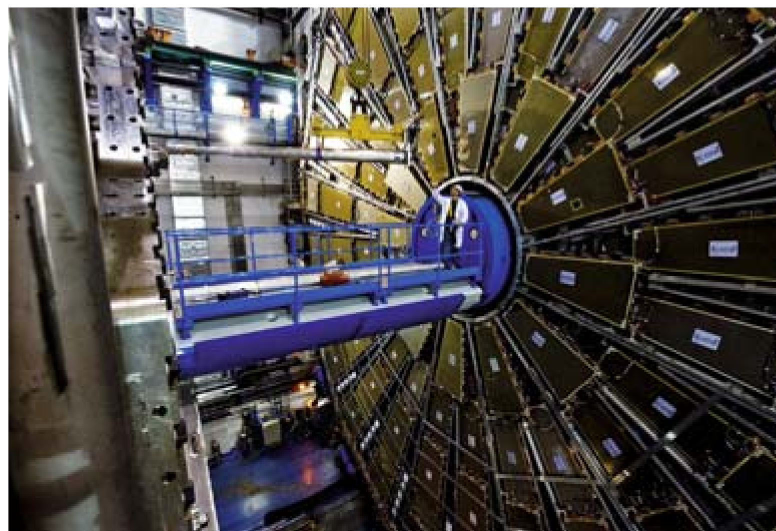


CERN

supersimetría es real o no. Por otra parte, la supersimetría constituye, además, un ingrediente fundamental de la teoría de cuerdas. La noción misma de supersimetría se creó dentro de la teoría de cuerdas, en 1971, por obra de Pierre Ramond, mucho antes de que se señalase su posible utilidad para resolver el problema de las jerarquías de escala y antes también de que se la considerase una candidata a teoría unificada. La supersimetría es necesaria para la consistencia matemática de la teoría de cuerdas. Si se descubre la supersimetría en el LHC, significará un importante respaldo para la teoría de cuerdas en su calidad de candidata a describir todas las interacciones de la naturaleza.

Hay que señalar que la teoría de cuerdas, aunque contiene como ingrediente fundamental la supersimetría, no predice de manera estricta que las partículas supersimétricas (squarks, sleptones, etcétera) deban ser descubiertas en el LHC. La razón es que la teoría puede también ser consistente en una situación en que estas partículas porten una masa





CMS-CERN (*inserto*)

mucho mayor, inalcanzables para el LHC. Sin embargo, parece indudable que la detección de dichas partículas significaría un fuerte espaldarazo para la teoría.

Dimensiones extra y agujeros negros en el LHC

Hay algunas alternativas más exóticas en lo que se refiere a la posible física que se observará en el LHC. Una de ellas es la observación de la posible existencia de dimensiones espaciales extra. Como ya mencionábamos, en los últimos diez años se ha descubierto que la escala de energías de la teoría puede ser, en principio, muy baja, de unos mil o diez mil GeV, del orden de las energías alcanzables en el LHC. Si ello se confirma, resultaría posible generar réplicas de Kaluza-Klein del gravitón, señales de la existencia de dimensiones adicionales. ¿Cómo podrían observarse en el LHC?

Las partículas en cuestión, al interaccionar sólo gravitacionalmente, no dejarían traza en los detectores; su efecto sería observable de

El autor

Luis E. Ibáñez es catedrático en la Universidad Autónoma de Madrid y director del departamento teórico del Instituto de Física Teórica UAM-CSIC. Fue miembro del CERN durante ocho años y trabaja en física de partículas elementales. Recibió el Premio Iberdrola de Ciencia y Tecnología en 1997; son reconocidas sus contribuciones a la construcción del modelo estándar supersimétrico, así como al estudio de la fenomenología de la teoría de cuerdas.

forma indirecta, por una violación aparente de la conservación de la energía, como pasa con los neutralinos de las teorías supersimétricas, aunque de una manera algo diferente. La detectabilidad depende del tamaño de las seis dimensiones extra. Además, si la escala de la cuerda fuera de unos 1000 o 10.000 GeV, podrían producirse en el LHC partículas con masa correspondientes a vibraciones de más alta frecuencia de la cuerda: en cierta manera, se vería de forma directa la estructura de cuerdas de la materia.

Con una escala M_{cuerda} tan baja, otra posibilidad es la creación de microagujeros negros en las colisiones de los protones del LHC. Hasta se ha llegado a afirmar que tales agujeros negros supondrían una catástrofe para la Tierra. La idea es que, una vez creados, absorberían la materia que los rodease y destruirían el planeta. Tales suposiciones carecen de base científica seria. Se ha comprobado que en el caso de que el LHC fuese capaz de producir dichos objetos, se desintegrarían emitiendo fotones (la llamada radiación de Hawking), antes de que pudieran tocar las paredes de los detectores del LHC. Hay incluso una forma indirecta de saber que el LHC nunca podrá crear una catástrofe de este tipo. La Tierra está siendo continuamente bombardeada por partículas y núcleos atómicos muy energéticos, los llamados rayos cósmicos, provenientes de nuestra galaxia y de fuera de ella. Muchos de estos rayos cósmicos poseen energías mucho mayores que las que el LHC será capaz de producir. Llevan bombardeando la Tierra y otros astros visibles desde hace miles de millones de años. La misma estabilidad de la Tierra y de otros objetos estelares durante todo este tiempo demuestra que tal proceso catastrófico no puede suceder. Se puede decir que la naturaleza lleva creando de forma puntual colisionadores como el LHC naturales sin que haya tenido lugar ninguna catástrofe.

Perspectivas del LHC

En resumen: si la escala de la cuerda resulta cercana a las energías abordables al LHC, se podría comprobar la realidad de la teoría de cuerdas de una forma directa. La existencia de dimensiones extra y de la estructura de cuerdas de la materia se comprobaría si se produjesen réplicas del Kaluza-Klein del gravitón, partículas con masa correspondientes a vibraciones de las cuerdas o ambas cosas.

Por otra parte, parece bastante más probable que M_{cuerda} y la escala de las dimensiones extra M_{KK} sean comparables, en cuyo caso, las réplicas de Kaluza-Klein y las vibraciones masivas de la cuerda tendrían masas enormes, con valores del orden de mil billones de veces la energía abordable mediante el LHC. En ese caso, la teoría sólo se podría contrastar de forma indirecta. Entonces, para que las partículas de Higgs puedan conferir masa a las partículas del modelo estándar parece que se requeriría, como ya hemos dicho, la existencia de partículas supersimétricas observables en el LHC.

La detección de partículas supersimétricas en el LHC nos daría importante información acerca de qué estructura concreta de la teoría de cuerdas podría describir el modelo estándar. El trabajo ingente de los últimos veinte años, encaminado a identificar soluciones de la teoría que den lugar a una estructura lo más cercana posible al modelo estándar supersimétrico, ha producido decenas de soluciones que, aunque no reproducen de forma perfecta todos los detalles del modelo estándar, están muy cerca de conseguirlo.

En ciertos tipos de soluciones también es posible calcular relaciones entre las masas de las partículas supersimétricas. Por ejemplo, el cociente entre las masas de los squarks y de los gluinos, o el cociente de las masas de los gluinos y neutralinos. Si en el acelerador LHC se producen estos diferentes tipos de partículas supersimétricas y los resultados para sus masas están de acuerdo con alguna de las soluciones de compactificación, se podrá obtener información valiosa sobre la estructura de la teoría de cuerdas subyacente y confirmar o descartar muchas formas de compactificación.

Estamos viviendo en estos momentos una situación muy especial en la física fundamental. El Gran Colisionador de Hadrones del CERN, esfuerzo colectivo de la ciencia europea e internacional, está a punto de revelarnos la estructura más íntima de la materia. El origen de la masa de las partículas y el descubrimiento del bosón de Higgs es un importante objetivo. Sin embargo, todo parece indicar que habrá más sorpresas: la observación de partículas supersimétricas, dimensiones extra..., o algo inesperado que los físicos no hemos podido imaginar. El LHC aportará información de interés sobre la posible estructura de cuerdas de la materia. La supersimetría es un ingrediente fundamental de la teoría de cuerdas. Si en el LHC se descubren partículas supersimétricas, ello significará una importante prueba circunstancial en favor de la validez de esta ambiciosa teoría.

El LHC tomará datos durante varios años. Su análisis llevará también bastante tiempo. Todos confiamos en que estos datos abrirán nuevas puertas al conocimiento más íntimo de la materia y esperamos con impaciencia los primeros resultados.

Bibliografía complementaria

UNIFICACION Y DUALIDAD EN TEORIA DE CUERDAS. L. E. Ibáñez en *Investigación y Ciencia*, págs. 62-69; agosto, 1998.

EL GRAN COLISIONADOR DE HADRONES. G. P. Collins en *Investigación y Ciencia*, págs. 15-23; abril, 2008.

Los límites del crecimiento tras el cenit del petróleo

En los años setenta, el interés se centraba en el crecimiento demográfico mundial y la limitación de los recursos disponibles para sostenerlo. La cuestión perdió actualidad, pero es hora de volver a pensar en ella

Charles A. S. Hall y John W. Day, Jr.

En los últimos decenios se han debatido ampliamente los efectos de la actividad humana en el medio, sobre todo en el cambio climático y la biodiversidad, pero se ha prestado mucha menos atención a los recursos básicos que necesitamos. El agotamiento de los recursos y el crecimiento de la población siguen progresando, aunque no les hagamos caso. Entre estos problemas, uno apremia más que los demás: la producción mundial de petróleo parece haber dejado ya atrás su máximo. Se habría cumplido la predicción de que se estaba cerca de un "pico", o un "cenit", petrolífero, tras el que vendría un decrecimiento continuo del número anual de barriles extraídos. Además, se nos están echando encima otras dificultades ligadas a los recursos y la economía, hasta el punto de que Richard Heinberg habla de "cenit de todo". En nuestra opinión, estos asuntos quedaron bien establecidos, y con precisión suficiente, por una serie de científicos a mediados del siglo pasado: la realidad demuestra el acierto de la mayoría de sus ideas. Muchas de ellas se exponían con detalle en un libro de referencia: *The Limits to Growth* [Los límites del crecimiento], publicado en 1972.

En los años sesenta y setenta, cuando preparábamos nuestro doctorado, tanto los planes de estudio como nuestras reflexiones acusaban una fuerte influencia de los ecólogos y científicos de la computación que, con claridad y elocuencia, advertían del conflicto, cada vez mayor, entre una población en ascenso cuyas necesidades materiales no cesaban de aumentar y los limitados recursos del planeta.

La crisis de precios del petróleo y las largas colas en las gasolineras en los años setenta fueron para muchos la confirmación de que los investigadores tenían razón y el crecimiento se enfrentaba a ciertos límites. Comprendíamos con claridad que la naturaleza frenaba la cultura expansionista de la economía estadounidense; así, por ejemplo, el primero de los autores preparó en 1970 un plan de pensiones muy conservador partiendo del supuesto de que en 2008, fecha en que debería jubilarse, habríamos dejado ya atrás el cenit del petróleo.

Seguimos pensando así, pese a que tales ideas hayan desaparecido, al menos hasta hace muy poco, de la mayoría de los debates, foros mediáticos y programas de estudios. Nos parece que poca gente reflexiona hoy sobre estas cuestiones y que quienes lo hacen, acostumbran pensar que la técnica y la economía de mercado resuelven esos problemas. Las advertencias contenidas en *The Limits of Growth*, incluso la idea más general de límites al crecimiento, no se consideran válidas.

Los propios ecólogos ya no ponen gran parte de su atención en los recursos; ahora la

CONCEPTOS BASICOS

- Malthus argumentó a finales del siglo XVIII que el crecimiento de la población, que tendía ser exponencial, estaba limitado por el crecimiento sólo lineal de la producción de alimentos. Sin embargo, su predicción no se cumpliría en los dos siglos siguientes.
- En los años sesenta, diversos ecólogos y economistas, como Paul Ehrlich y Garrett Harding, reconsideraron la idea de Malthus. Esta tendencia alcanzó su expresión más concreta en el informe "Los límites del crecimiento", de 1972, patrocinado por el Club de Roma. De nuevo, pareció que las dos décadas siguientes refutaban ese punto de vista.
- Las predicciones del modelo económico de "Los límites del crecimiento" se han cumplido aceptablemente hasta el día de hoy. Está aún por ver que las oscilaciones violentas que prevé para décadas venideras vayan realmente a producirse.



1. LA POBLACION MUNDIAL SE HA DUPLICADO en las cuatro últimas décadas. Aunque la pobreza castigue ciertas regiones, el mundo ha evitado una hambruna general aumentando el uso de combustibles fósiles, que permiten producir más alimentos. Pero, ¿qué pasará cuando se agote el petróleo barato? Se ha hecho muy poco caso de las predicciones de 1970 porque hasta ahora no hemos padecido graves carencias de combustibles. Sin embargo, al reconsiderar los modelos de hace 35 años se ve que sus proyecciones, por el momento, se van cumpliendo.

LADI KIRN/ALAMY/*American Scientist*

centran, y no es que les falten razones para ello, en las diversas amenazas que se ciernen sobre la biosfera y la biodiversidad. Raramente mencionan la ecuación entre recursos básicos y población humana que constituía el punto esencial para los pioneros de la ecología. Por ejemplo, el número de febrero de 2005 de *Frontiers in Ecology and the Environment* estaba dedicado a "Visiones de un futuro ecológicamente sostenible", pero el término "energía" sólo aparecía como "energía creativa personal"; "recursos" y "población humana" apenas se mencionaban.

Pero, ¿es que ha fallado la teoría de los límites al crecimiento? Aun antes de la crisis financiera de 2008, los periódicos desbordaban de historias sobre el encarecimiento de la energía y los alimentos, la proliferación de hambrunas asociadas a disturbios en numerosas ciudades, y carencias de materias muy diversas. Desde entonces, los titulares han pasado a señalar el colapso de sistemas bancarios, el galopante desempleo y la inflación, así como una recesión económica general. Varias voces achacan el caos económico actual, al menos en una medida apreciable, al aumento de los precios del crudo a principios de 2008.

Aunque muchos sigan rechazando los augurios de los años setenta, crecen las pruebas de que acertaron en la valoración general —aunque no siempre en los detalles o fechas exactas— de los riesgos que comporta el incesante crecimiento de la población humana y sus niveles de consumo en un mundo enfrentado a limitaciones muy reales. Es hora de reconsiderar esos argumentos a la luz de nuevas informaciones, especialmente en lo que se refiere al cenit del petróleo.

Primeros avisos

Los debates sobre el conflicto entre población y recursos se inician siempre con Thomas Malthus y la publicación en 1798 de su *First Essay on Population*:

"Creo que puedo formular sin reparos dos postulados. El primero, que los alimentos son necesarios para la existencia del hombre. El segundo, que la pasión entre los sexos es necesaria y que se mantendrá siempre casi en su estado actual [...] Considerando aceptados mis postulados, afirmo que la capacidad de crecimiento de la población es infinitamente mayor que la capacidad de la Tierra de producir alimentos para el hombre. La población, si no encuentra obstáculos, aumenta en progresión geométrica. Los alimentos tan sólo aumentan en progresión aritmética. Basta con poseer las más elementales nociones de números para

apreciar la inmensa diferencia a favor de la primera de estas dos fuerzas."

Casi nadie niega, y nosotros no somos una excepción, que, entre 1800 y el día de hoy, el vaticinio de Malthus no se ha cumplido: la población humana se ha multiplicado aproximadamente por siete, con una mejora en la nutrición y la riqueza general, aunque tal mejora sea sólo reciente. Paul Roberts cuenta en *The End of Food* que la desnutrición fue común durante todo el siglo XIX, y que sólo en el siglo XX permitieron las baratas energías de origen fósil elevar la productividad agrícola en grado suficiente para prevenir el hambre.

No es la primera vez que se sostiene este argumento: nuestro crecimiento exponencial en el consumo de energía, incluida la agricultura, explica que la generación de alimentos haya crecido en progresión geométrica, a semejanza de la población. Así pues, si desde los tiempos de Malthus hemos evitado una hambruna general para casi todos los pueblos de la Tierra, ha sido gracias a que ha crecido también en progresión geométrica el consumo de combustible fósil.

Los primeros científicos del siglo XX que retomaron la ley de Malthus fueron los ecólogos Garrett Hardin y Paul Ehrlich. Entre los ensayos que Hardin escribió en el decenio de los sesenta sobre los efectos de la superpoblación, se cuenta el famoso artículo "La tragedia de los bienes comunales"; con su título se denomina ahora a la tendencia de los individuos a sobreexplotar en propio beneficio bienes comunes, aunque perjudique a los demás. En otros ensayos, Hardin acuñó frases como "la libertad para criar trae ruina para todos" y "jamás muere nadie de superpoblación" (es decir, no como causa directa, pero sí a través de las enfermedades y hambrunas que trae consigo y conducen a la muerte). Esta última frase aparecía en un ensayo acerca del tifón que en 1970 arrasó las costas de Bangladesh, con miles de personas ahogadas. Según Hardin, esa gente sabía que la región estaba expuesta a inundaciones frecuentes, pero se quedaron allí porque no tenían otro lugar para vivir en un país tan superpoblado. El desastre se repitió en 1991 y 2006.

Paul Ehrlich sostuvo en *The Population Bomb* que el continuo crecimiento demográfico asolaría el suministro de víveres, la sanidad y la naturaleza: más pronto que tarde, los procesos maltusianos (guerra, hambre, peste y muerte) mantendrían la población humana "bajo control", de modo que no superase un nivel que el mundo pudiera mantener.

Entre tanto, el agrónomo David Pimentel y los ecólogos Howard Odum y John Steinhart cuantificaron la dependencia energética de la agricultura moderna y demostraron que el desarrollo técnico va casi siempre asociado a un mayor uso de los combustibles fósiles. Otros ecólogos, como George Woodwell y Kenneth Watt, analizaron el impacto negativo de la población en los ecosistemas. Kenneth Boulding, Herman Daly y unos pocos economistas más empezaron a cuestionar los propios cimientos de la economía, entre ellos que se disociara de la biosfera necesaria para sustentarla y, sobre todo, que se centrase en el crecimiento y en la creencia de que siempre se encontrará algo que sustituya a un recurso escaso. Estos autores moldearon nuestra formación doctoral en ecología a finales de los años sesenta.

Al mismo tiempo, Jay Forrester, inventor de un tipo de memoria de acceso aleatorio (RAM) para ordenadores, fue desarrollando una serie de análisis interdisciplinarios y procesos racionales bajo el nombre de "dinámica de sistemas". En sus libros y artículos sobre estos modelos expuso las dificultades que un



2. ESTA ALDEA DE UNA ISLA COSTERA DE BANGLADESH fue devastada por un ciclón en 1991, en el que perecieron más de 125.000 personas. En 1970 ya se había padecido una catástrofe semejante y en 2006 habría otra. Los habitantes de la zona conocen el riesgo, pero la superpoblación no les permite trasladarse a regiones más seguras.



3. EN 1979 HUBO QUE FORMAR LARGAS COLAS para aprovisionarse de gasolina racionada en un período de escasez de producción y fuertes subidas del crudo. Sucesos de este tipo reforzaban la hipótesis de que la finitud de los recursos naturales podría poner límites al crecimiento de la población mundial.

AP WIDE WORLD PHOTOS (*arriba*); BETTMAN/CORBIS (*abajo*)/*American Scientist*



4. EN EL SUDESTE DE ETIOPIA, asolado por la sequía, los desplazados esperan la distribución oficial de agua. Los niños que intentan sacar agua antes de la hora señalada son expulsados a bastonazos por un guarda. Estos incidentes demuestran que el agua también es un recurso limitado.

crecimiento demográfico ininterrumpido le plantearía a un mundo finito. Pronto, al último de esos modelos se le llamaría “modelo de los límites del crecimiento”, o del “Club de Roma”, por el nombre de la organización que solicitó su publicación.

Perfeccionaron los modelos y los presentaron a la opinión pública discípulos de Forrester, entre ellos Donella Meadows y Dennis Meadows. Demostraron que el crecimiento exponencial de la población y del uso de los recursos, combinado con la finitud de éstos y la contaminación, conducirían a un grave descenso en la calidad material de vida e incluso a una disminución de la población humana.

Parámetro	Predicho	Real
Población	6900 millones	6700 millones
Indice de natalidad por 1000 personas	29	20
Indice de mortalidad por 1000 personas	11	8,3
Valores respecto al nivel de 1970 (fijado en 1,0)		
	Predicho	**Real**
Recursos	0,53	
Cobre		0,5
Petróleo		0,5
Suelo		0,7
Pesca		0,3
Contaminación	3,0	
CO_2		2,1
Nitrógeno		2
Producción industrial per cápita	1,8	1,9

5. LOS VALORES predichos por el modelo de “los límites del crecimiento” se acercan mucho a los datos reales de 2008. El modelo abordaba los recursos y la contaminación con categorías genéricas, pero a efectos comparativos se dan los valores actuales, aproximados, de algunos ejemplos concretos. Es difícil obtener datos para un período de tiempo tan largo; probablemente muchos contaminantes, como los de las cloacas, hayan aumentado más de lo que señalan las cifras. Otros, como el azufre, están bien controlados en numerosos países.

Por otro lado, el geólogo M. King Hubbert predijo en 1956, y de nuevo en 1968, que la producción de crudo en Estados Unidos (sin contar Alaska y Hawai) llegaría a su máximo en 1970. Aunque entonces no se le hiciera caso, el crudo estadounidense tuvo realmente su cenit en 1970 y el gas natural, en 1973.

En 1973 parecían haberse cumplido estas perspectivas sobre los límites del crecimiento: durante la primera crisis de la energía, el precio del crudo se elevó desde 3,50 hasta más de 12 dólares por barril. La gasolina subió en Estados Unidos de 0,30 a 0,65 dólares por galón (unos cuatro litros) en pocas semanas, al paso que descendían las reservas disponibles, a causa de una diferencia transitoria de sólo un 5 por ciento entre el suministro y la demanda previsible. Por primera vez tuvieron que aguantar los estadounidenses colas en las gasolineras, fuertes subidas de precios de otras fuentes de energía y una inflación de más del diez por ciento acompañada de una contracción en la actividad económica total. Los economistas habían estado creyendo que una situación así era imposible; inflación y estancamiento económico parecían incompatibles. También hubo fuertes subidas en el gasóleo de calefacción, la electricidad, los alimentos y el carbón. En 1979 los precios volvieron a subir: hasta 35 dólares el barril de crudo y hasta 1,60 dólares el galón de gasolina.

A principios de los ochenta se reprodujeron algunos de los trastornos económicos de 1974: las mayores tasas de paro desde la Gran Depresión, los altos tipos de interés y la escalada de precios. Mientras tanto, llegaban informes científicos sobre problemas ambientales de todo género: lluvia ácida, calentamiento global, contaminación, pérdida de la biodiversidad y enrarecimiento de la capa protectora de ozono. La escasez del crudo, las colas de la gasolina, incluso ciertos apagones eléctricos de los años setenta y los primeros ochenta, parecían abonar la opinión de que nuestra población y nuestra economía habían superado con creces la capacidad de la Tierra. Muchos creían que el mundo se iba a desmoronar. Quienes conocían la idea de los límites del crecimiento pensaron que las predicciones del modelo empezaban a cumplirse, y, por tanto, era válido. Las cuestiones demográficas y energéticas fueron tema de discusión universal.

Nuestras propias contribuciones a esta labor se centraron en evaluar los costes energéticos

AP IMAGES/BRENNAN LINSLEY (*arriba*); STEPHANIE FREESE (*abajo*)/*American Scientist*

de muchos aspectos de la gestión de los recursos y del medio: el abastecimiento alimentario, la administración fluvial y, sobre todo, la obtención de la energía misma. Nuestros artículos examinaron con especial detenimiento la *tasa de retorno energético* del petróleo y el gas en EE.UU.; vimos que descendió notablemente de 1930 a 1970. Pronto se comprobó que el retorno energético era todavía menor para casi todas las alternativas posibles. Este descenso significaba que habría que dedicar una parte cada vez mayor de la producción de energía para obtener la que la economía necesita.

Pero se volvieron las tornas

Tanto interés comenzó, sin embargo, a desvanecerse cuando la subida de los precios provocó la afluencia de enormes cantidades de crudo y de gas de yacimientos extranjeros aún no explotados. La mayoría de los economistas tradicionales, y no sólo ellos, rechazaba que la naturaleza impusiera límites al crecimiento económico y a la actividad humana en general. Creían que el giro de los acontecimientos y los nuevos recursos petrolíferos les daban la razón.

La teoría económica hegemónica (o neoclásica) casi siempre se presenta desde el ángulo de la "eficiencia": las fuerzas del mercado en libertad buscan los precios más bajos en cada coyuntura, y su efecto neto debería conseguir los mínimos precios posibles. Al menos en teoría, habría un despliegue óptimo de todas las fuerzas productivas.

Especialmente molestos por la idea de que pudiera darse una escasez absoluta de recursos, los economistas dirigieron acerbas críticas a los científicos antes mencionados, sobre todo a quienes más defendían que el crecimiento tenía límites. Presentaban la fusión nuclear como posible fuente de energía barata y abundante en el futuro, y no encontraban prueba alguna de tal escasez, aduciendo que la producción había experimentado un alza del 1,5 al 3 por ciento anual. Y, como principal argumento, sostenían que las economías contaban con mecanismos, asociados al mercado (la mano invisible de Adam Smith), para afrontar la escasez.

Un importante estudio empírico de los economistas Harold J. Barnett y Chandler Morse, de 1963, parecía demostrar que —una vez descontada la inflación— los precios de todos los recursos básicos (excepto los forestales) no habían aumentado en 90 años. Así, aunque quedaran pocas dudas de que los recursos de mejor calidad se estaban agotando, parecía que las innovaciones técnicas y las sustituciones de recursos, estimuladas por el mercado, habían resuelto y resolverían indefinidamente los problemas planteados a largo plazo. Era como si el mercado pudiese aumentar la cantidad de recursos físicos de la Tierra.

La nueva marcha de la economía general parecía apoyar esta idea. A mediados de los ochenta, el precio de la gasolina había caído notablemente. Se abrió el enorme campo petrolífero de Prudhoe Bay, en Alaska, que en cierto grado mitigaba el descenso de la producción de crudo en el resto de EE.UU., aunque las importaciones siguieran creciendo para cubrir las necesidades nacionales. La energía dejó de ser tema habitual en los medios y en las conversaciones. Se suponía que los mercados liberalizados promovían la eficacia; prueba de ello era el descenso de la energía consumida por unidad de producción económica en Japón y EE.UU. Además, la electricidad ya no se obtenía sobre todo del petróleo, sino del carbón, el gas natural y el uranio.

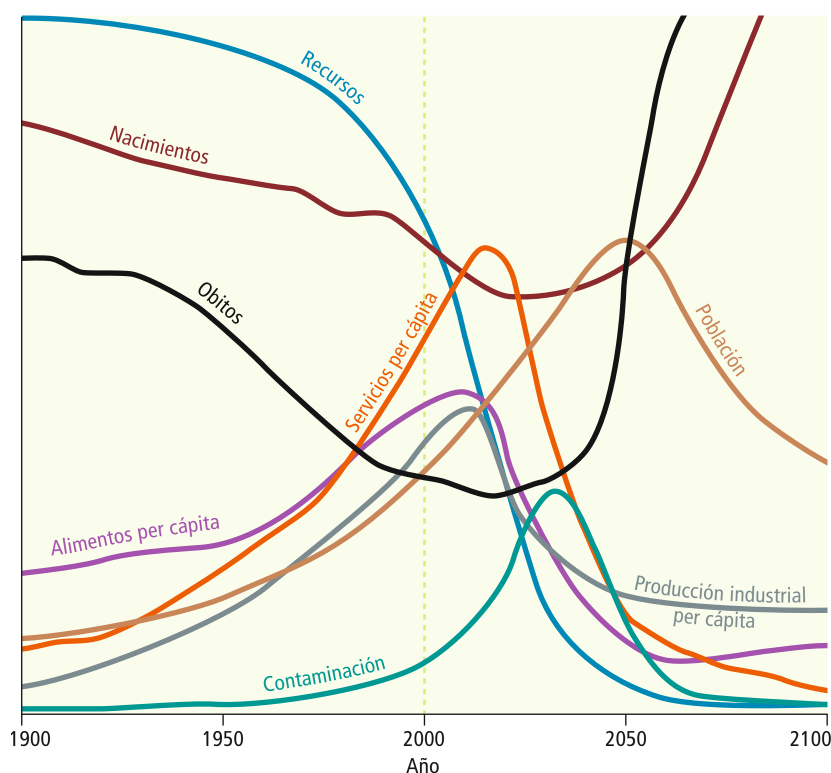
En 1980, a Paul Ehrlich, uno de los portavoces más informados y elocuentes que tenía la biología en materia de recursos, "le arrastraron", según sus propias palabras, a apostar sobre el precio futuro de cinco minerales frente al economista Julian Simon, firme defensor del poder del ingenio humano y del mercado, que no creía en los límites del crecimiento. Los precios de esos materiales cayeron en los 10 años siguientes, y Ehrlich (con otros dos colegas) perdió la apuesta; tuvo que pagarle 576 dólares a Simon. El incidente logró una amplia difusión en los medios, con un artículo despectivo del *New York Times Magazine*. Quienes defendían que los recursos estaban limitados se vieron desacreditados e incluso humillados.

En opinión de muchos, era como si la mano invisible del mercado hubiese respon-



6. EL PETROLEO NO ES EL UNICO RECURSO que puede haber llegado ya a su cenit y sobrepasado la capacidad de la Tierra de aguantar el presente nivel de consumo. En Cerdeña, los pescadores capturan un 80 por ciento menos de lo que acostumbraban pescar sus padres.

CHRISTIAN SCIENCE MONITOR/GETTY IMAGES/*American Scientist*

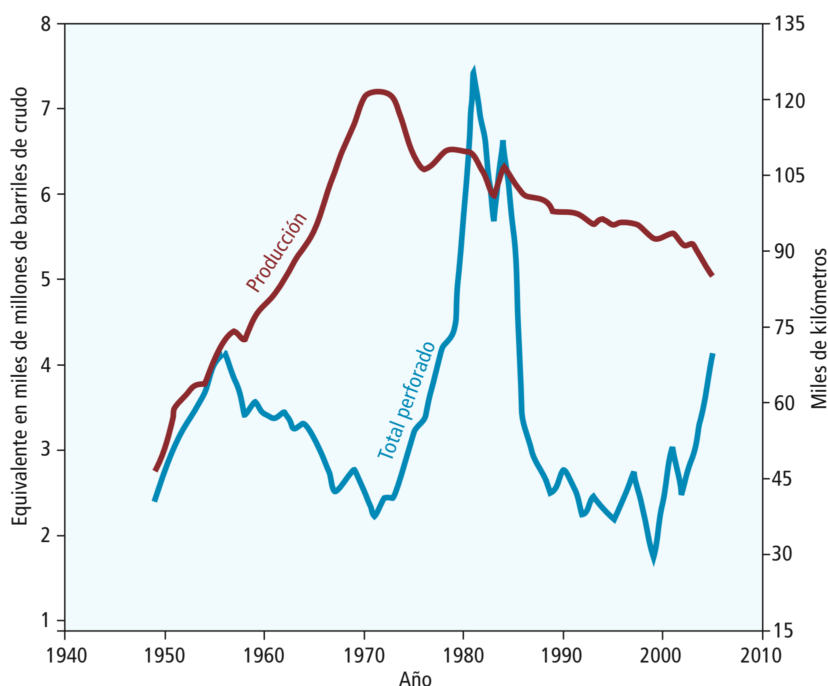


7. EN LAS PREVISIONES ORIGINALES del modelo de los límites del crecimiento se examinaba la relación que guarda una población en ascenso con los recursos y la contaminación, pero no se incluía una escala de tiempos entre 1900 y 2100. Si se añade una marca a la mitad, en 2000, se ve que las previsiones hasta el momento actual resultan bastante precisas; sólo el futuro dirá si se cumplen las fuertes oscilaciones que augura para los próximos años.

dido por medio de sustituciones y señales de precios. Los economistas se sintieron reivindicados y los pesimistas en materia de recursos se batieron en retirada, aunque ciertos efectos del estancamiento económico de los setenta persistieron hasta cerca de 1990 en casi todo el mundo. (Todavía subsisten en lugares como Costa Rica, que tiene una deuda pendiente desde esa época.) En los primeros noventa, las economías mundiales y la de EE.UU. habían regresado al modelo de crecimiento anterior a 1973: al menos 2 o 3 por ciento anual con tasas de inflación no muy altas. Los precios, corregidos para tener en cuenta la inflación, de la gasolina —para casi todos, principal barómetro de la escasez de energía— se estabilizaron y hasta descendieron bastante en respuesta al flujo de crudo importado. Los debates sobre la escasez desaparecieron de la escena.

La idea de que el mercado es en última instancia el factor que decide los valores e instrumento óptimo para generar prácticamente cualquier decisión fue ganando más y más credibilidad, en parte a causa de los debates acerca de la subjetividad de las decisiones de expertos u organismos legislativos. Las decisiones se apoyaban cada vez más en análisis económicos de coste-beneficio, pues se suponía que las preferencias colectivas democráticas de la gente se reflejaban en sus elecciones económicas.

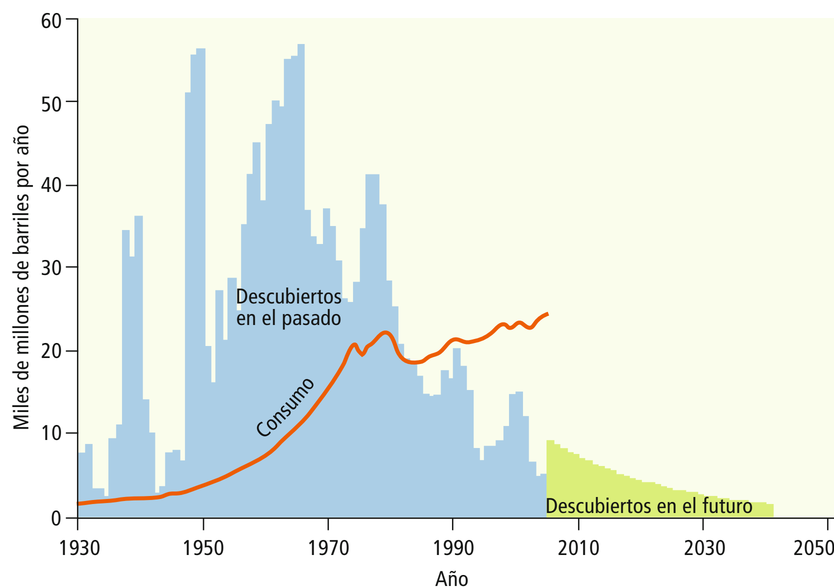
Los escasos científicos que aún se preocupaban por la escasez de recursos no podían acudir a ningún centro específico para solicitar subvenciones, ni a la Fundación Nacional para la Ciencia, ni siquiera al Departamento de Energía (salvo para estudios orientados a mejorar la eficacia energética), así que la mayoría de nuestros mejores expertos trabajaban en estas cuestiones en fines de semana, una vez jubilados o por amor a la humanidad. Con muy pocas excepciones, se descuidó la formación académica sobre análisis energéticos o límites del crecimiento. El concepto de límite pervivió en algunas cuestiones ambientales, como la desaparición de los bosques y de las barreras de coral o el cambio climático global.



8. SE INDICAN, AÑO TRAS AÑO, LOS SONDEOS DE CRUDO Y DE GAS realizados en los Estados Unidos desde 1949 hasta 2005 y la producción allí durante el mismo período. Si todos los demás factores se mantienen idénticos, el beneficio energético desciende cuando los sondeos son más profundos, ya que la prospección y la perforación consumen mucha energía. Su valor, para encontrar nuevos campos petrolíferos, puede ahora acercarse a la relación 1:1.

BARBARA AULICINO (*arriba*); STEPHANIE FREESE (*abajo*)/*American Scientist*

9. EL RITMO AL QUE SE DESCUBRE NUEVO PETROLEO en el mundo ha descendido durante décadas (*azul*) y se prevé que caiga todavía más deprisa en años futuros (*verde*). El consumo mundial, sin embargo, continúa subiendo (*línea roja*). Por tanto, es de esperar que la demanda de crudo se distancie cada vez más del suministro. (Datos proporcionados por la Asociación de Estudio del Petróleo y del Gas.)



Pero se abordaban como problemas específicos, no dentro de una consideración más general de la relación entre población y recursos.

Mirar más de cerca

Para una distinguida minoría de los científicos, nunca hubo dudas de que la victoria de los economistas en el debate era, cuando menos, ilusoria, y se basaba por lo general en una información incompleta. En ese sentido, Cutler J. Cleveland, de la Universidad de Boston, volvió a analizar en 1991 el estudio de Barnett y Morse; descubrió que la única razón de que no hubiesen subido los precios de las materias primas —pese a estar agotándose sus existencias de mejor calidad— era el abaratamiento real de la energía durante el período abordado en el estudio original, que a su vez se debía al incremento exponencial del uso de petróleo, gas y carbón, cuyos precios reales estuvieron bajando. De ahí que, aun necesitándose más energía para cada unidad de recursos, el precio de éstos no aumentara.

Asimismo, cuando la crisis del petróleo indujo una recesión en los primeros ochenta, tiempo de la apuesta de Ehrlich y Simon, la relajada demanda de todos los recursos provocó la bajada de precios, e incluso cierto aumento de calidad de los recursos extraídos de las minas, ya que sólo se mantuvieron abiertas las más productivas. Sin embargo, en los últimos años los precios de la energía han vuelto a subir, ha remontado la demanda de materiales en Asia y la mayoría de los minerales se ha encarecido de forma espectacular. Si Ehrlich hubiera apostado con Simon en el decenio pasado, habría ganado una pequeña fortuna, pues el precio de casi todas las materias primas, incluidas las que figuraban en la apuesta, subió de 2 a 10 veces en respuesta a la ingente demanda de China y a la degradación de los recursos.

Otro problema concierne a la propia definición económica de "eficiencia", que no es unánime. Varios investigadores, entre ellos los autores, han encontrado que el uso de la energía —factor que no había intervenido en las ecuaciones de producción de los economistas— es mucho más importante que el capital, la mano de obra o la técnica para explicar el aumento de la producción industrial en EE.UU., Japón y Alemania. Un reciente análisis de Vaclav Smil descubrió que, en los últimos diez años, la eficacia energética de la economía japonesa había descendido un 10 por ciento. Una serie de estudios demuestran que la mayoría de las técnicas agrícolas utilizan energía en gran cantidad. En otras palabras, cuanto más detallados y sistémicos son los análisis emprendidos, más complejos y ambiguos se tornan los razonamientos. La técnica raramente actúa por sí sola: tiende a exigir un uso de los recursos elevado.

Y ha descendido un 50 por ciento la producción de crudo en EE.UU., según predijera Hubbert. El mercado no pudo solucionar esta caída puesto que, a pesar de los enormes aumentos de los precios y las perforaciones de los últimos años setenta y toda la década siguiente, se produjo menos crudo y menos gas, y desde aquel momento ya no ha habido una relación esencial entre las perforaciones efectuadas y los índices de producción de crudo y gas estadounidenses.

Suele pensarse, incluso lo creen ecólogos bien informados, que el modelo de los límites del crecimiento fue un fallo estrepitoso: obviamente, no se han cumplido sus predicciones de extrema contaminación y descenso de la población. Pero lo que muchos ignoran es que el modelo original, basado en la informática de aquel momento, inducía a engaño. El gráfico no señalaba fechas entre los años 1900 y 2100. Si se dibuja una línea vertical sobre el punto medio del eje de tiempos, es decir, para el año 2000, se ve que el modelo se está cumpliendo (si se admiten ciertos supuestos) treinta y tantos años después de su formulación. Por supuesto, se desconoce

Los autores

Charles A. S. Hall es profesor de la escuela de montes y ciencias ambientales de la Universidad estatal de Nueva York en Siracusa. **John W. Day** es profesor emérito del departamento de oceanografía y ciencias litorales de la Universidad estatal de Luisiana. Ambos son ecólogos de sistemas y expertos en energía y gestión de recursos.

todavía cómo funcionará en el futuro, cuando su comportamiento será más dinámico.

Aunque no defendamos contra viento y marea que esa estructura concreta del modelo de los límites del crecimiento sea la idónea para la tarea que le corresponde, debe reconocerse que sus predicciones no han sido invalidadas; más bien, parecen bastante atinadas. No conocemos modelo alguno elaborado por economistas que tenga tal precisión durante un período tan extenso.

Esquivar a Malthus

Hasta el más acérrimo defensor de la escasez de recursos aceptará que la predicción de Malthus no se ha cumplido en el planeta entero: desde que la formuló, la población humana se ha multiplicado casi por siete; en muchas regiones sigue creciendo. Pero la inanición no es general, aunque sí sean frecuentes la desnutrición y la pobreza. ¿Cómo ha sido posible?

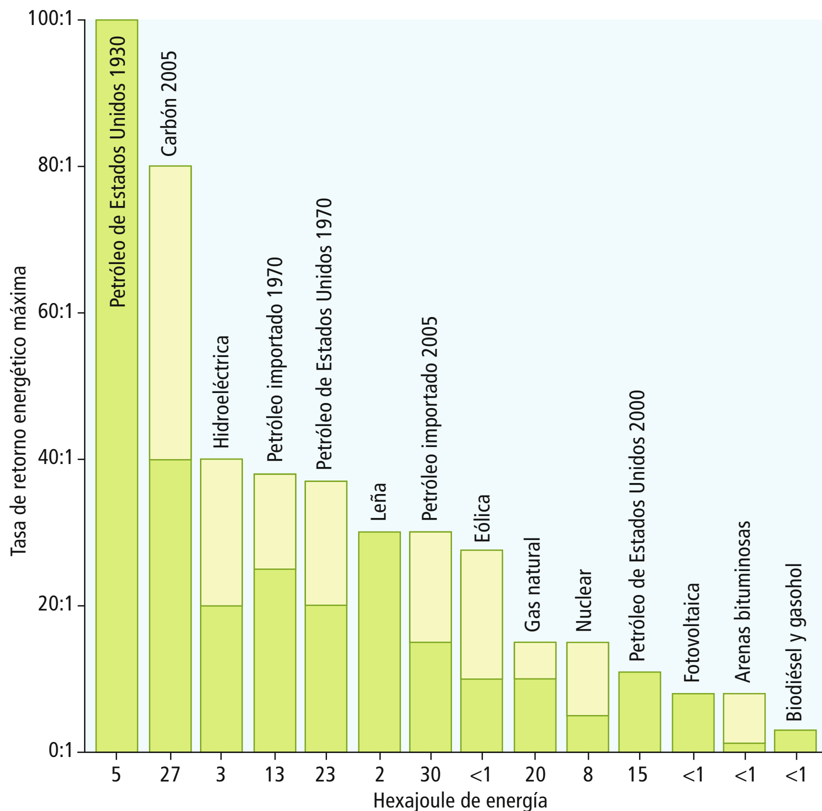
La respuesta más general es que la técnica, combinada con la economía de mercado u otros sistemas de incentivos sociales, ha aumentado enormemente la capacidad de la Tierra de acoger seres humanos. No olvidemos, sin embargo, que es un arma de doble filo, cuyos beneficios pueden verse empañados por la *paradoja de Jevons*: los aumentos de eficiencia a menudo conducen a reducir los precios y, por tanto, a consumir mayor cantidad de recursos.

Y las técnicas no trabajan gratis. Como ya señalaran Odum y Pimentel a comienzos de los setenta, el crecimiento de la producción agrícola se consigue principalmente gastando más combustible fósil para el cultivo, abonos, pesticidas, el secado y demás tareas: para generar una caloría de alimento se han de consumir en torno a 10 calorías de petróleo. El combustible gastado se distribuye casi a partes iguales entre las actividades agrícolas, el transporte y procesado, y la preparación. El efecto neto es que cerca del 19 por ciento de la energía consumida en EE.UU. se gasta en el sistema alimentario. Malthus no podía haber previsto este enorme incremento de la producción alimentaria debido al petróleo.

De modo análogo, los combustibles fósiles fueron esenciales para el desarrollo de muchas economías nacionales, como ocurrió en EE.UU. y Europa en los dos últimos siglos y hoy sucede en China e India. En la mayoría de los países en vías de desarrollo hay una relación casi lineal entre el desarrollo de las economías y el consumo energético; cuando escasea la energía, las economías se contraen, como ocurrió en Cuba en 1988. (Ha habido, no obstante, una fuerte expansión de la economía estadounidense desde 1980 sin que la acompañara un aumento del consumo de energía equiparable. Esta excepción quizá se deba a la fabricación en el extranjero de gran parte de su industria pesada, más que en casi ningún otro país.)

Por consiguiente, la mayor parte de la riqueza se genera con un consumo cada vez mayor de petróleo y otros combustibles. Cada habitante de Europa y de EE.UU. dispone, por término medio, de 30 a 60 “esclavos energéticos”, máquinas que “le sierran los árboles y le acarrean el agua”, y aportan una potencia igual a la de muchas personas robustas.

Una clave del futuro es, por lo tanto, hasta cuándo seguirá habiendo combustibles abundantes y baratos, sean fósiles o no. Del petróleo y el gas natural se obtienen cerca de dos tercios



10. LA TASA DE RETORNO ENERGETICO es la razón entre la cantidad de energía aprovechable que se produce y la energía que se requiere para producirla. Lo mejor es obtener mucho más de lo que se aporta. En la producción de petróleo en Estados Unidos, la tasa ha descendido desde alrededor de 100:1 en 1930 a 40:1 en 1970, y hasta cerca de 14:1 a día de hoy. En la mayoría de las fuentes de energía “verdes”, como la fotovoltaica, la tasa de retorno se mantiene baja. (Los colores pálidos indican el rango de valores posible debido a la variación de las condiciones y la inseguridad de los datos.)

STEPHANIE FREESE/*American Scientist*

de la energía consumida en el mundo, y otro 20 por ciento, del carbón.

No es cierto que vivamos en una era de la información, ni en una era posindustrial, ni siquiera (por el momento) en una era solar, sino en una era del petróleo. Por desgracia, esto se va a acabar: la producción de petróleo y de gas ha llegado, o pronto llegará, a su cima. En EE.UU. el petróleo la alcanzó en 1970. Hoy también la han alcanzado al menos 18 —y tal vez en la mayoría— de los 50 países de mayor producción mundial. Lo que más importa saber sobre el cenit del petróleo no es su propia existencia, sino cuál será la forma de la cresta y qué pendiente tendrá la curva de descenso de la producción cuando acaezca a escala mundial.

La otra gran pregunta sobre el petróleo no es cuánto queda bajo tierra (gran cantidad, desde luego), sino cuánto puede extraerse con un provecho energético apreciable. El factor de retorno energético del petróleo estadounidense descendió desde alrededor de 100:1 en 1930 a 40:1 en 1970 y hasta cerca de 14:1 en 2000. Con todo, estas cifras son positivas, si se las compara con las del petróleo que se extraerá de yacimientos nuevos: según la escasa información disponible, parece que su retorno será de 1:1 de aquí a pocos decenios.

La mayoría de los yacimientos petrolíferos del mundo se descubrieron a través de prospecciones en nuevas regiones. Los de muy gran capacidad afloraron bastante pronto, y hacia 1980 se había descubierto ya la mayor parte de la reserva de crudo mundial. Según Colin Campbell, geólogo defensor de la tesis del cenit: "El mundo entero ha sido investigado ya mediante prospecciones sísmicas y cribado. Los conocimientos geológicos han mejorado en los últimos 30 años; es casi inconcebible que aparezcan nuevos campos petrolíferos de gran magnitud".

Escasez de la energía

El mundo afronta hoy enormes problemas que atañen a la población y los recursos. Hacia mediados del siglo pasado, estas ideas se debatieron con agudeza, y casi siempre con rigor, en numerosas publicaciones, pero luego se fueron borrando de la esfera científica y pública. Quizá fuera debido a que no se comprendiera bien el contenido de aquellas primeras publicaciones y la validez de muchas de sus predicciones.

La mayoría de los textos sobre ciencias ambientales se centran más en los efectos negativos de los combustibles fósiles que en las repercusiones de nuestra aplastante dependencia de ellos en el plano económico e incluso alimentario. No saber introducir en el discurso y en la enseñanza científica la realidad y las posibles implicaciones del cenit del petróleo, y de cualquier fuente de energía o de materiales, entraña una grave amenaza para la sociedad industrial.

La idea de que pueda ocurrir un fiasco ingente y poliédrico de una parte sustancial de la civilización industrial les es tan ajena a nuestros gobernantes, que nos sentimos indefensos ante tal coyuntura. En importantes cuestiones ambientales y sanitarias, desde el consumo del tabaco hasta las inundaciones de Nueva Orleáns, siempre los efectos negativos han precedido en varios decenios a las decisiones políticas y la admisión general por el público.

Funcionan con petróleo o sus derivados todos los medios de transporte actual, salvo la bicicleta y los zapatos (que también pueden contenerlo). La producción de alimentos consume mucha energía; la ropa, los muebles y la mayoría de los fármacos contienen petróleo o lo utilizan, y la mayoría de los oficios dejarían de existir si faltara el petróleo. Pero en nuestras universidades sería difícil percibir preocupación alguna, más allá de quejarse del aumento de precio de la gasolina, pese a habernos aproximado, en el verano y el otoño de 2008, a una situación parecida a la escasez de gasolina de los setenta, en respuesta a tres años de producción de petróleo estancada; la situación sólo se alivió cuando la crisis financiera disminuyó la demanda de crudo.

No se ha desarrollado ningún agente capaz de sustituir al petróleo a una escala semejante a la requerida: casi todos ellos dan un rendimiento energético muy pobre. Pese a sus notables promesas, las fuentes de energía renovables (que no sean la hidráulica o la leña) proporcionan hoy menos del 1 por ciento de la energía utilizada en el mundo; el incremento del consumo anual de la mayoría de los combustibles fósiles es, por lo general, mucho mayor que la producción total de electricidad (no digamos ya que su aumento) por medio de aerogeneradores y plantas fotovoltaicas. Nuestras nuevas fuentes de energía "verde" van simplemente aumentando a la vez que las tradicionales (no las sustituyen).

Si nos proponemos resolver estas cuestiones, incluida la muy importante del cambio climático, con plena claridad, necesitamos que vuelvan a ser tema central de la educación en todos los niveles de nuestras universidades, que se discutan y se defiendan contra todos los que nieguen su importancia, pues en estas materias hoy no tenemos a muchos que nos guíen intelectualmente. Hemos de enseñar la economía desde un enfoque tanto biofísico como social. Sólo entonces contaremos con la oportunidad de comprender o resolver estos problemas.

Bibliografía complementaria

SCARCITY AND GROWTH: THE ECONOMICS OF NATURAL RESOURCE AVAILABILITY. H. Barnett y C. Morse. Johns Hopkins University Press; Baltimore, 1963.

IMPACT OF POPULATION GROWTH. P. R. Ehrlich y J. P. Holdren en *Science*, vol. 171, págs. 1212-1217; 1971.

PETROLEUM DRILLING AND PRODUCTION IN THE UNITED STATES: YIELD PER EFFORT AND NET ENERGY ANALYSIS. C. A. S. Hall y C. J. Cleveland en *Science*, vol. 211, págs. 576-579; 1981.

FIN DE LA ERA DEL PETROLEO BARATO. C. Campbell y J. Laherrere en *Investigación y Ciencia*; mayo, 1998.

THE MYTH OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT: PERSONAL REFLECTIONS ON ENERGY, ITS RELATION TO NEOCLASSICAL ECONOMICS, AND STANLEY JEVONS. C. Hall en *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 126, págs. 86-89; 2004.

LIMITS TO GROWTH: THE 30-YEAR UPDATE. D. Meadows, D. Meadows y J. Randers. Chelsea Green Publishers; White River, Vertmont, 2004.

A COMPARISON OF THE LIMITS OF GROWTH WITH 30 YEARS OF REALITY. G. M. Turner en *Global Environmental Change*, vol. 18, págs. 397-411; 2008.

Claves de la Superconductividad a altas temperaturas

Se ha descubierto que los pnicturos de hierro superconducen a 50 grados sobre el cero absoluto. El hallazgo reaviva la búsqueda de mejores superconductores de alta temperatura y arroja luz sobre el fenómeno

Graham P. Collins

CONCEPTOS BASICOS

- Los superconductores al uso conducen corriente eléctrica sin pérdidas de energía, pero sólo a temperaturas próximas al cero absoluto. Los de óxido de cobre (cupratos) traspasaron en los años ochenta una barrera térmica largo tiempo mantenida, pero su adaptación a la industria manifiesta problemas.
- Tal propiedad parecía exclusiva de los cupratos, hasta que en 2008 se descubrió que otros compuestos, los pnicturos, también superconducían muy por encima del cero absoluto.
- El estudio de los pnicturos podría ayudar a comprender el comportamiento de los cupratos y quizás a fabricar superconductores que operen a temperatura ambiente.

En 2006, el grupo de Ideo Hosomo, del Instituto de Tecnología de Tokio, no buscaba superconductores. Se proponía crear nuevos tipos de semiconductores transparentes, aptos para pantallas planas, cuando observaron que una nueva sustancia (combinación de lantano, oxígeno, hierro y fósforo) presentaba, a menos de cuatro kelvin (–269 grados Celsius), una resistencia nula al paso de la corriente eléctrica; es decir, se tornaba superconductora.

Aunque 4 K sea muy inferior a la mínima temperatura registrada hasta hoy en un laboratorio (138 K) y mucho menor que la anhelada "temperatura ambiente" (300 K), quienes descubren un superconductor se asemejan al navegante que estrena un nuevo yate. Al patrón le interesa saber qué velocidad alcanzará; al físico, hasta qué temperatura máxima superconducirá el material en sus distintas variantes.

Las aplicaciones industriales de los superconductores se ven frenadas por la necesidad de sistemas de refrigeración complejos, costosos y voluminosos. Cualquier elevación de la temperatura de funcionamiento aliviaría esos inconvenientes y haría técnica y económicamente viables aplicaciones inéditas.

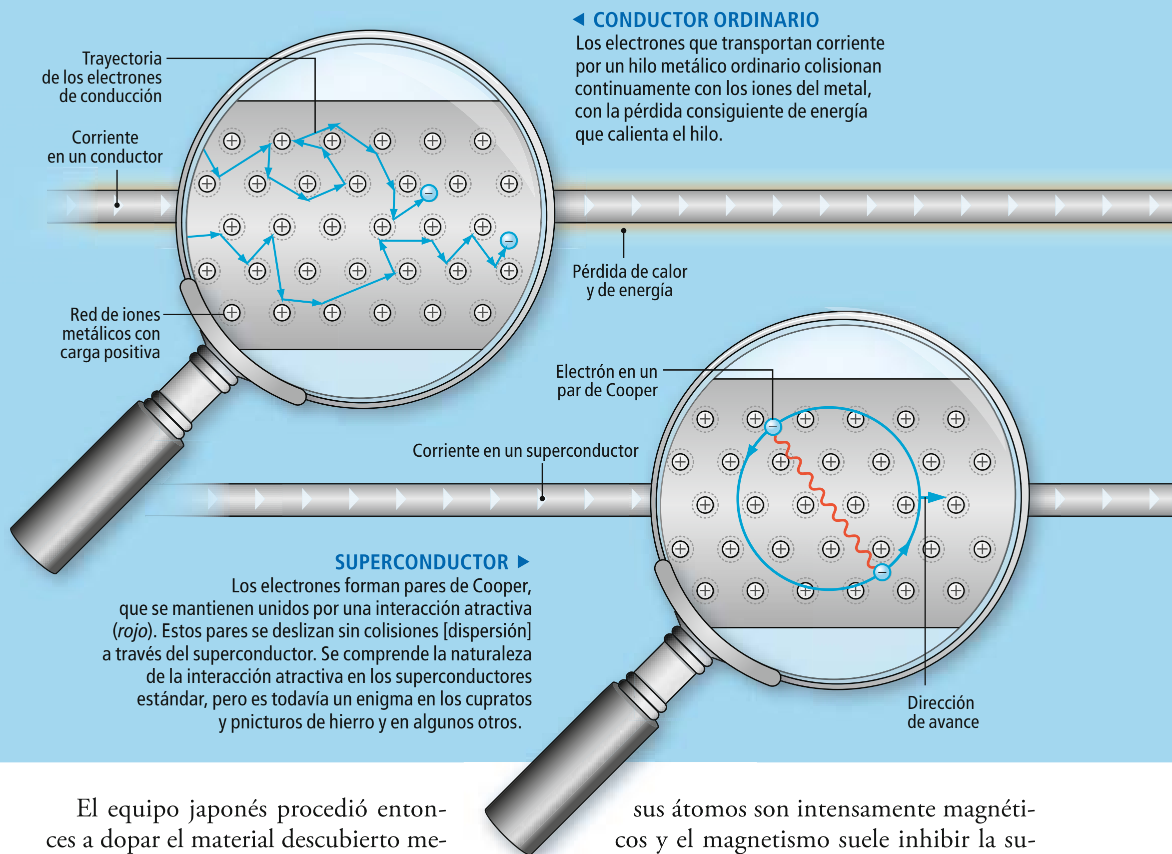
Los ingenieros piensan en cables eléctricos que transporten sin pérdidas potencias enormes e imanes compactos de potencia extraordinaria (destinados a la formación de imágenes por resonancia magnética, trenes levitados, aceleradores de partículas y otras maravillas), todo ello sin afrontar los enormes gastos y molestias de los sistemas de enfriamiento por helio líquido que requieren los fríos y anticuados superconductores al uso.



JAMIE CHUNG (*fotografía*), BRIAN BRYN (*diseño*)

Cómo se origina la superconducción

Un conductor ordinario extrae energía de la corriente eléctrica al colisionar los electrones portadores de corriente con los iones metálicos del conductor (*arriba*). En el superconductor, por el contrario, los electrones forman "pares de Cooper" (*abajo*), reuniéndose todos ellos en un singular estado cuántico de energía mínima (condensado de Bose-Einstein). La ola de pares de Cooper avanza de forma solidaria. Para desalojar de esa ola un par de Cooper se necesitaría pasar a un estado cuántico de mayor energía, y la obtenida de la colisión con un ion metálico no es suficiente. La corriente fluye, pues, sin pérdidas de energía.



LUCY READING-IKKANDA

IMPORTANCIA DE LA TEMPERATURA

La mayoría de los superconductores en uso se basan en el mismo agente refrigerante utilizado por Heike Kamerlingh Onnes cuando descubrió la superconductividad hace casi un siglo: helio líquido, que hierve a 4,2 kelvin e introduce considerables gastos y complicaciones. Los superconductores habituales corresponden a aleaciones de niobio que alcanzan los 18 K (en ausencia de campos magnéticos). En presencia de campos magnéticos o altas densidades de corriente, se requiere un enfriamiento adicional para mantener la superconductividad. Los potentísimos imanes de aleación de niobio del Gran Colisionador de Hadrones, por ejemplo, trabajan a 2,9 K. Los nuevos materiales que funcionen a temperaturas muy superiores a las del helio líquido van a revolucionar las aplicaciones de los superconductores.

El equipo japonés procedió entonces a dopar el material descubierto mediante la incorporación de átomos extraños a la receta. Con ello pretendían aumentar la temperatura de transición. La sustitución de algunos átomos de oxígeno por otros de flúor prolongó hasta 7 K la superconductividad. El cambio de fósforo por arsénico consiguió extender dicho estado hasta 26 K, temperatura suficientemente elevada para interesar a físicos de todo el mundo y suscitar una oleada de investigaciones cuando el grupo publicó su trabajo sobre el arsénico a finales de febrero de 2008. Al terminar marzo, investigadores en China ya disponían de compuestos similares que superconducían hasta 40 K, y hasta 56 K un mes más tarde.

Esos impresionantes resultados, aunque lejos de los logrados en los dos últimos decenios por los superconductores de óxido de cobre (cupratos), fueron interesantes por varias razones. Primera: nadie podía saber hasta dónde se lograría elevar la temperatura crítica. Segunda: se creía más fácil desarrollar aplicaciones con compuestos férricos que con cupratos, que son quebradizos y requieren una fabricación compleja para las grandes longitudes que se necesitan en cables de energía eléctrica y en imanes.

A ello se añade la peculiaridad del hierro como parte integrante de un superconductor: sus átomos son intensamente magnéticos y el magnetismo suele inhibir la superconductividad. Además de la conducción perfecta, una característica esencial del superconductor es la de obligar a cualquier campo magnético a rodearlo, en vez de atravesar su interior. Si el campo es suficientemente intenso para penetrar en el semiconductor, lo destruye. ¿Cómo es posible que el magnetismo de los átomos de hierro contenidos en el material no desbarate el fenómeno? El enigma sigue sin resolverse.

Pero quizá lo más sobresaliente sea que los nuevos compuestos de hierro han desbancado a los cupratos como tipo de semiconductores presumiblemente único. Durante más de veinte años, los cupratos habían resistido a todas las formulaciones teóricas que trataban de explicar sus propiedades, sobre todo sus elevadas temperaturas de transición. Ahora que disponen de dos tipos de materiales para comparar y contrastar, los expertos podrían por fin descubrir las claves de la superconductividad a altas temperaturas.

Estratificación

La esperanza de hallar en los superconductores férricos claves que ayuden a entender los cupratos se refuerza por las abundantes semejanzas entre ambas clases de compuestos. Unos y otros operan a temperaturas más altas

que los demás superconductores conocidos. Dentro de cada tipo, cada compuesto presenta un nivel de dopado óptimo en el que se hace máxima la temperatura de transición (o temperatura crítica, por debajo de la cual el material se torna semiconductor). Dicha temperatura disminuye si las muestras están dopadas por encima o por debajo del nivel óptimo; termina en el cero absoluto cuando se aleja bastante de ese nivel. En otras palabras, una muestra dopada muy en exceso o en defecto no es en absoluto superconductora.

La semejanza más evidente es, sin embargo, que tanto los cupratos como los pnicturos de hierro se componen de capas de átomos alternadas. En los cupratos se alternan capas de óxido de cobre (CuO_2); los nuevos materiales, en cambio, constan de capas de pnicturo de hierro (hierro unido a un elemento del grupo del nitrógeno en la tabla periódica, como fósforo, arsénico o antimonio). En el material de 26 K de Hosono, capas de óxido de lantano (LaO) se alternan con capas de arseniuro de hierro (FeAs).

Las capas de pnicturo de hierro y de óxido de cobre vienen a ser la "carne" de estos "bocadillos" cristalinos; se cree que es allí donde se produce la superconductividad. Las capas de "pan" no hacen más que aportar o sustraer electrones a las de "carne". Si se dopa el LaOFeAs con flúor, cada átomo de flúor empieza con un electrón más que el de oxígeno que reemplaza: estos electrones suplementarios se trasladan a las capas de FeAs, lo que altera sus propiedades eléctricas.

Observados desde arriba, los átomos de la capa de FeAs aparecerían situados en una suerte de tablero de ajedrez nanométrico: un átomo de hierro en cada casilla negra y otro de arsénico en cada casilla blanca. Las capas de CuO_2 de los cupratos son semejantes, pero sólo la mitad de las casillas negras están ocupadas por un átomo de cobre; en esas capas todos los átomos se hallan en un mismo plano. Por el contrario, los átomos de arsénico de las capas de FeAs se sitúan por encima y por debajo del nivel de los átomos de hierro: en torno de cada átomo de hierro hay cuatro átomos de arsénico dispuestos según los vértices de un tetraedro. Como sucede en casi todas las propiedades de los materiales, queda por desentrañar si reviste mayor importancia la similitud o la disparidad de las estructuras.

La disposición estratificada afecta profundamente a las propiedades de los cupratos superconductores. Se comportan de distinta manera, según la corriente de superconducción (supercorriente) sea paralela o sea perpendicular a los estratos. El efecto de un campo magnético sobre la supercorriente en un cristal de cuprato depende de la dirección del campo. La superconductividad resiste un campo magnético mucho más intenso cuando éste se halla alineado con las capas de cobre que cuando es perpendicular a ellas. Esta propiedad tiene consecuencias importantes, ya que numerosas aplicaciones de la superconductividad implican la generación de fuertes campos magnéticos. Efectos de este tipo arrojan también luz sobre el origen de la superconductividad en los cupratos.

Durante 20 años se ha ahondado en esas líneas teóricas para explicar la creación de superconductividad en una capa de cuprato. Se ha considerado esencial la bidimensionalidad. Ello resulta razonable desde una perspectiva teórica, pues en matemáticas y física abundan los ejemplos de sistemas que presentan propiedades y fenómenos de carácter exclusivamente bidimensional o que se complican al considerarlos en tres dimensiones. Y en el caso de los cupratos, numerosos experimentos resaltan la importancia del plano CuO_2.

La primera investigación sobre los pnicturos de hierro parecía seguir el mismo camino. Sin embargo, a finales de julio de 2008, dos equipos, uno dirigido por Nan-Lin Wang, de la Academia de Ciencias China, y el otro por Paul C. Canfield, de la Universidad del estado de Iowa, con la colaboración del Laboratorio Nacional de Los Alamos, descubrieron por separado que un determinado superconductor de pnicturo de hierro respondía de modo muy similar a campos magnéticos intensos con orientaciones distintas. Ese material, en el que las capas de bario dopado con potasio se alternan con las de arseniuro de



LEVITACION

Además de presentar una resistencia eléctrica nula, el superconductor no tolera campos magnéticos en su interior: es perfectamente diamagnético. Ello hace que el superconductor levite sobre un imán (disco superior) o a la inversa. Los superconductores de tipo 2 permiten que el flujo magnético los penetre a través de delgados tubos asentados en defectos del material; un superconductor de ese tipo queda suspendido bajo un imán (disco inferior).

CHARLES O'REAR *Corbis* (*arriba*); LUCY READING-IKKANDA (*abajo*)

El hierro reaviva las brasas

El hallazgo en 1986 de los cupratos (óxidos de cobre) como superconductores de alta temperatura fue todo un acontecimiento. En una sesión sobre cupratos en un simposio organizado en 1987 por la Sociedad Americana de Física, miles de investigadores desbordaron el aula y continuaron allí hasta la madrugada siguiente.

A este frenético comienzo siguió un largo y frustrante esfuerzo por entender el comportamiento de los cupratos. Durante dos decenios se han investigado estos materiales con un verdadero arsenal de técnicas: dispersión de neutrones, espectroscopía electrónica y microscopía por dispositivos superconductores de exploración con interferencia cuántica. Pese a todo, sigue sin aclararse el embrollado proceso físico por el que se crea la superconductividad de alta temperatura.

Al aparecer en la escena los pnicturos de hierro, el viejo entusiasmo se reavivó; sus temperaturas de transición venían en segundo lugar después de los cupratos y sus estructuras tenían cierto parecido. Los físicos están llevando a cabo en los materiales de hierro los experimentos realizados durante 20 años con los cupratos, esperando hallar pistas esenciales en las semejanzas y diferencias entre unos y otros compuestos. La solución del misterio podría abrir el camino hacia la superconducción a temperatura ambiente, que transformaría la técnica por vías insospechadas.



PROGRESOS EN MATERIALES

En los 98 años de historia de la superconductividad, se ha descubierto un variado surtido de materiales que superconducen.

1911 Mercurio 4,2 kelvin
El primer superconductor fue descubierto por Heike Kamerlingh Onnes cuando enfrió mercurio con helio líquido por debajo de su temperatura de transición de 4,2 K.

1941 Aleaciones de niobio 16-23 K
El uso de los semiconductores en la industria no se inició hasta 1961, al descubrirse que el niobio-estaño (Nb_3Sn), que superconduce a 18,3 K, transportaba corrientes elevadas y resistía campos magnéticos intensos.

1971 Niobio-germanio 23 K
Este material (Nb_3Ge) mantuvo el récord de temperaturas de transición de 1971 a 1986.

1979 Fermiones pesados 0,5-1,0 K
Los superconductores de fermiones pesados como el uranio-platino (UPt_3) destacan por poseer también electrones con masa efectiva cien veces mayor que la habitual. La teoría clásica no explica la superconductividad de estos materiales.

1986 Cupratos 35-138 K
Estos materiales cerámicos, los primeros superconductores de alta temperatura, pudieron ya enfriarse con nitrógeno líquido, que hierve a 77 K.

1991 Fullerenos 18-33 K
Cristales sólidos formados por buckybolas (C_{60}), que superconducen cuando están dopados con átomos de metales alcalinos, como potasio, rubidio y cesio.

1995 $HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$ 138 K
Dopado con talio, este cuprato tiene la más alta temperatura de transición conocida a la presión atmosférica. A presiones elevadas superconduce hasta 164 K.

2001 Diboruro de magnesio 39 K
Por su inusitadamente alta temperatura de transición, este compuesto es una excepción de la superconductividad estándar.

2006 Pnicturos de hierro 4-56 K
Hideo Hosono (*derecha*) descubrió el primero de estos compuestos, que forman la segunda clase de superconductores de alta temperatura.

hierro y que superconduce hasta cerca de 38 K, aparenta poseer superconductividad tridimensional.

Según Jan Zaanen, de la Universidad de Leiden, si los cupratos y los pnicturos de hierro comparten el mismo secreto de la superconductividad de alta temperatura, el experimento anterior indicaría que la bidimensionalidad ha sido siempre un señuelo que desviaba la atención de los científicos.

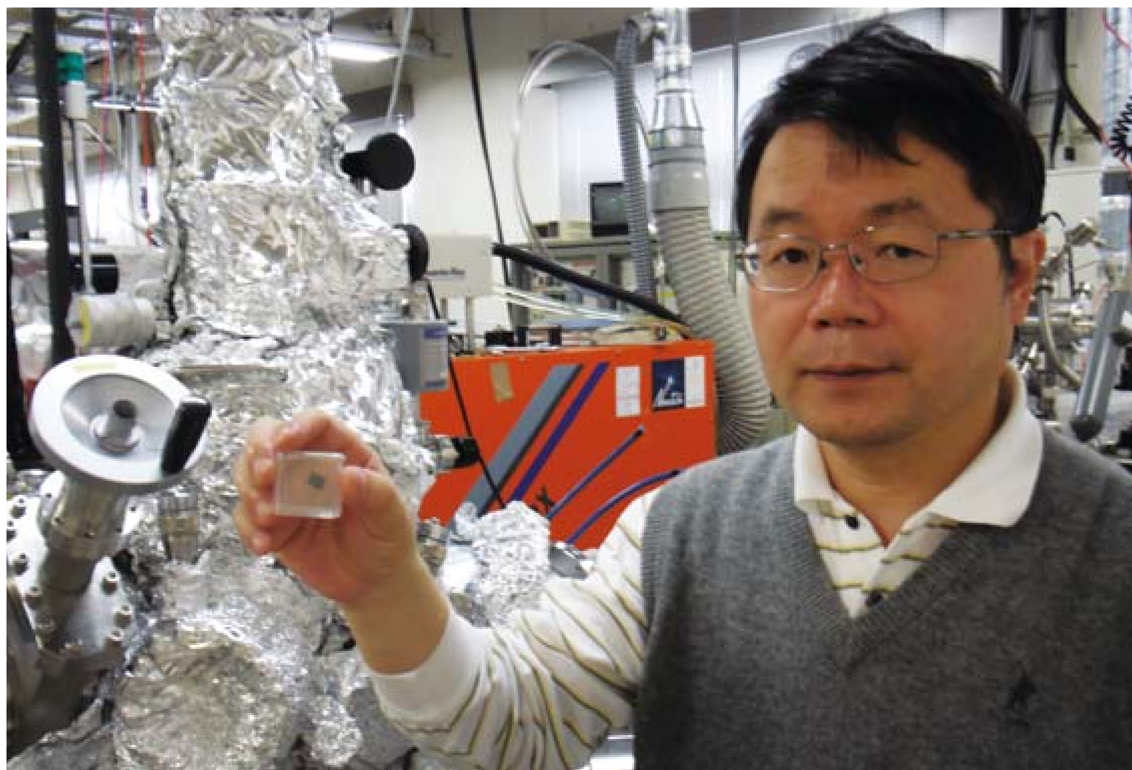
Cuantos de sonido

El secreto de la superconductividad de alta temperatura que Zaanen y otros tratan de desvelar mediante el estudio de cupratos y pnicturos corresponde a una información muy específica sobre el motivo de tal superconductividad. En particular, desean saber cuál es la interacción entre los electrones implicados que provoca el estado de superconducción. En un metal ordinario, la corriente eléctrica es transportada por los electrones de conducción, libres para moverse en el seno del material. Esos electrones, sin embargo, chocan de continuo con iones metálicos de carga positiva, que extraen energía de la corriente y calientan el metal (resistencia eléctrica del conductor).

La superconductividad aparece cuando los electrones de conducción se unen entre sí formando parejas (pares de Cooper). Estos pares acumulan su masa en un solo estado cuántico, mediante la condensación de Bose-Einstein. El torrente de partículas dotadas de carga eléctrica se mueve entonces de forma solidaria a través del material, sin perder energía en las colisiones con iones metálicos; la resistencia cae hasta cero. Las mediciones confirman que los portadores de corriente eléctrica, en cupratos y pnicturos de hierro, tienen doble carga que el electrón: son, por consiguiente, pares de Cooper. Pero también debería comprenderse el mecanismo de formación de esos pares. Según la explicación clásica de la superconductividad —teoría desarrollada en 1957 por John Bardeen, Leon N. Cooper y J. Robert Schrieffer, de ahí su nombre BCS—, un elemento muy prosaico cumple esa misión: el sonido.

El sonido consiste en vibraciones. El cuanto de vibración en un sólido corresponde al fonón, llamado así por analogía con el fotón, el cuanto de luz (o, si se prefiere, de vibraciones electromagnéticas). Entre dos electrones de conducción tiene lugar una interacción, por el intermedio de fonones, que puede observarse del modo siguiente: el campo eléctrico del primer electrón atrae con fuerza los iones metálicos con carga positiva al pasar cerca de ellos. El electrón va dejando en su estela una región transitoria de retícula distorsionada, verdadero asiento de los fonones. El segundo electrón experimentará una débil fuerza de atracción hacia la región momentáneamente alterada a causa del ligero aumento de la densidad de carga positiva que allí ha ocurrido. Basta esa pequeña atracción indirecta para producir pares de Cooper y crear superconductividad, siempre que la temperatura sea lo bastante baja para que las vibraciones térmicas no se sobrepongan al efecto. La teoría BCS apoya esta imagen heurística aproximada en una firme base matemática que permite el cálculo de la temperatura de transición del material a partir de sus propiedades.

Una de las verificaciones clásicas de dicha teoría corresponde a la diferencia de tempe-



CORTESIA DE HIDEO HOSONO

raturas de transición de dos isótopos de un material superconductor. El mercurio 198 superconduce a menos de 4,18 K; el mercurio 202, por debajo de 4,14 K. Los átomos de mercurio 202 son algo más pesados, vibran menos y en un tono más bajo; ello hace que la fuerza electrón-fonón sea más débil, los pares de Cooper más frágiles y se necesite menos energía térmica para anular la superconductividad.

Los estudios sobre cupratos, sin embargo, no revelan prácticamente ningún efecto isotópico; tal vez los fonones no sean el aglutinante principal de los pares de Cooper en estos materiales. Por muchas razones no cabe sorprenderse de tal resultado. Los cupratos superconducen a bastante más de 30 K; los cálculos teóricos han demostrado que a esas temperaturas elevadas la interacción electrón-fonón descrita en el modelo BCS no sería suficientemente intensa para mantener unidos los pares de Cooper en cualquier material.

En 2002 apareció una excepción a esta regla de los 30 K: el diboruro de magnesio, que superconduce a 39 K [*véase* "El diboruro de magnesio, superconductor a alta temperatura", Paul C. Canfield y Sergey L. Bud'ko; Investigación y Ciencia, junio de 2005]. Este compuesto sí acusa el efecto isotópico; se le considera superconductor de tipo BCS, aunque en calidad de variante peculiar del mismo. Unas temperaturas de transición tan altas se deben a acoplamientos extraordinariamente intensos entre ciertos electrones y las vibraciones reticulares, consiguiendo a partir de ahí dos poblaciones de electrones que forman dos condensados de pares de Cooper (un condensado para cada población).

En cuanto a los nuevos superconductores de hierro, cabe señalar que a las pocas semanas de publicarse en internet el hallazgo de Hosono sobre la superconducción del LaOFeAs a 26 K, salían a la luz cálculos teóricos que descartaban que en ese material el acoplamiento electrón-fonón fuera, según la teoría BCS, el aglutinador de los pares de Cooper. Lilia Boeri y sus colaboradores, del Instituto Max Planck de Física del Estado Sólido en Stuttgart, calcularon que la temperatura de transición sería inferior a 1 K si los fonones cumplieran su cometido teórico.

Merece señalarse, sin embargo, que se han descubierto algunos efectos isotópicos, en línea con la predicción de la teoría BCS. En el pasado mayo, el equipo de Xian Hui Chen, de la Universidad de Ciencia y Tecnología de China, observó que la formación de superconductores de arseniuro de hierro con dos isótopos de hierro influía acusadamente sobre su temperatura de transición. Parece, pues,

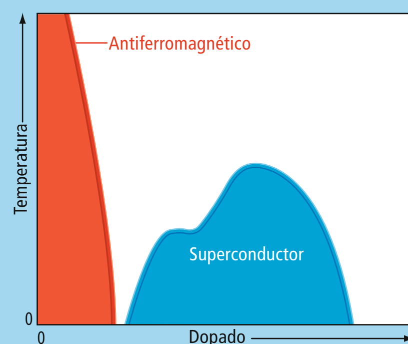
KENNETH EWARD *BioGrafx* (*estructuras moleculares*); LUCY READING-IKKANDA (*gráficas*); FUENTE: "IRON-BASED SUPERCONDUCTORS: UNITY OR DIVERSITY?" POR STEVEN A. KIVELSON Y HONG YAO, EN *NATURE MATERIALS*, VOL. 7; DICIEMBRE DE 2008

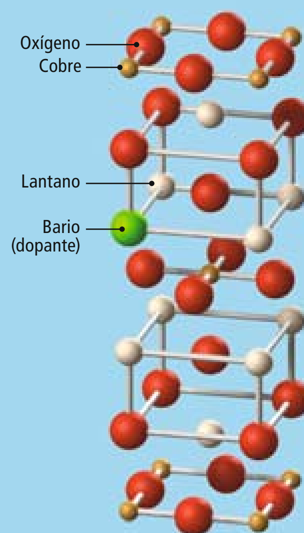
Anatomía de dos materiales

Los superconductores de cupratos y de pnicturos de hierro presentan numerosas semejanzas, pero también difieren en ciertos aspectos. Los físicos se esfuerzan por determinar qué características revisten mayor importancia para la superconductividad. Ambos materiales constan de capas alternadas de átomos, como aquí se ilustra para el cuprato La_2CuO_4 y el pnicturo de hierro LaOFeAs (*derecha*). En uno y otro caso, las propiedades del material dependen del nivel de dopado, o sea, de la incorporación de impurezas (sustitución de algunos átomos de lantano por átomos de bario en el cuprato, y de átomos de oxígeno por otros de flúor en el pnicturo). La variación de las propiedades del material con la proporción de dopado y la temperatura se representa en unos diagramas de fase (*izquierda*) que guardan semejanza con los diagramas de presiones y temperaturas en las que el agua pasa a vapor o forma diversos tipos de hielo.

CUPRATOS ▸

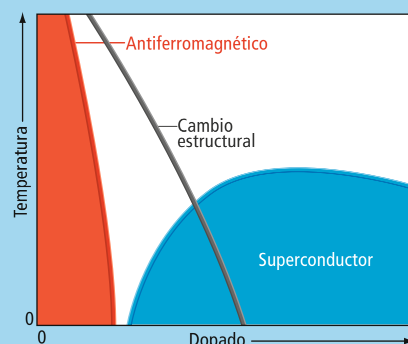
Con niveles de dopado bajos, los cupratos son aislantes y antiferromagnéticos (*rojo*). En cada capa de óxido de cobre, los átomos de cobre se alinean, cual diminutas brújulas, en la dirección opuesta a sus vecinos más próximos. Según aumenta el dopado, desaparece el antiferromagnetismo y el material se torna conductor (*blanco*); superconduce luego (*azul*) por debajo de una temperatura de transición, que depende de la proporción de dopado. El gráfico no muestra muchas fases exóticas del conductor "normal", que han de encontrar fundamento teórico a la par que la superconductividad.

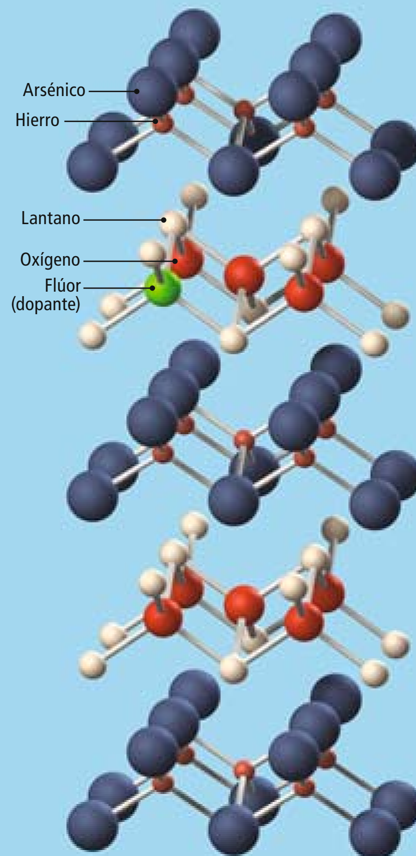




PNICTUROS ▸

Los pnicturos de bajo dopado también son antiferromagnéticos (*rojo*); con todo, ahí actúan como malos conductores metálicos más que como aislantes. Igual que en los cupratos, la fase de superconducción (*azul*) se inicia a bajas temperaturas dentro de una gama de niveles de dopado. Típicamente sufren un cambio estructural (*línea gris*): la disposición muy simétrica de los átomos de hierro correspondiente a niveles de temperatura y dopado bajos se estira cuando esos niveles aumentan. Ciertos experimentos sugieren que esta distorsión, no el propio dopado, es la que controla el comportamiento de los pnicturos.









que el acoplamiento electrón-fonón desempeña una función, pero también deben estar implicadas otras interacciones no incluidas en la teoría citada, ni en los cálculos de Boeri. Dichas interacciones podrían, asimismo, intervenir en los pares de Cooper formados en cupratos y así convertirse en el "secreto compartido" de la superconductividad a altas temperaturas.

Procesos que compiten

El estudio de la variación de la temperatura de transición según el nivel de dopado en cada pnicturo de hierro junto con el examen de las propiedades del material cuando no superconduce puede arrojar luz sobre otros procesos físicos clave para los superconductores de alta temperatura. Tal información se cartografía en los "diagramas de fase", análogos a los que ilustran los cambios de estado físico de una sustancia, como el agua, al variar la presión y la temperatura.

Si la proporción de dopado se registra en el eje de abscisas, el estado superconductor de un cuprato o pnicturo de hierro forma una región aproximadamente semicircular en la parte inferior del gráfico. Los límites de esa región señalan que, si el dopado es insuficiente o excesivo, el material no superconduce, ni siquiera en el cero absoluto; el punto más elevado indica la temperatura de transición máxima, que corresponde a una proporción de dopado óptima.

Se dan grandes semejanzas entre otras propiedades de los pnicturos y los cupratos para ciertas temperaturas y niveles de dopado. Cuando los niveles de dopado son demasiado bajos para la superconductividad, unos y otros materiales entran en un estado antiferromagnético. Un sencillo fragmento de hierro imantado constituye un ferroimán: cada átomo del material tiende a orientar su momento magnético, su minúscula "brújula", en la misma dirección que sus vecinos más inmediatos. Todos esos momentos magnéticos se combinan entonces para producir el campo magnético total



LOS SUPERCONDUCTORES al uso encuentran aplicaciones que van desde aceleradores de partículas como el Colisionador Relativista de Iones y Hadrones (*arriba*) y el Gran Colisionador de Hadrones hasta los giróscopos superconductores y detectores de campo magnético en la Sonda de Gravedad B (*centro*) y la formación de imágenes por resonancia magnética (*derecha*).

RUSS UNDERWOOD *Lockheed Martin Corporation*; FUENTE: NASA (*sonda de gravedad B*); SCIENCE SOURCE *Photo Researchers, Inc.* (*RHIC*); MEDICALRF.COM *Corbis* (*máquina de resonancia magnética*)

del imán. Por el contrario, cuando el material es antiferromagnético los átomos colindantes tienden a orientar en direcciones opuestas su momento magnético, sin crear ningún campo magnético total.

Los cupratos no dopados suelen ser antiferromagnéticos hasta temperaturas bien superiores a la temperatura de transición máxima del material dopado. Pero a medida que crece la proporción de dopado, disminuye la temperatura a la que aparece el antiferromagnetismo, cayendo hasta cero antes de que se manifieste la superconductividad. Los físicos lo interpretan como señal de que existen dos tipos de ordenaciones incompatibles y que compiten entre sí: la alineación antiferromagnética de los momentos magnéticos de los átomos y la formación de un condensado de pares de Cooper. La interacción generadora de superconductividad en estos materiales tiene que imponerse al antiferromagnetismo.

El comportamiento de los pnicturos es análogo: exentos de dopado, presentan un antiferromagnetismo que no aparece en el estado de superconducción. En diciembre de 2008, investigadores de EE.UU. y China que estudiaban cierto pnicturo de hierro (arseniuro de hierro, oxígeno y cerio, CeOFeAs, dopado con flúor) encontraron que el antiferromagnetismo desaparecía pronto al incrementar el dopado, como sucede en los cupratos.

Los mismos expertos examinaron una transición estructural que ahí se producía. En los planos de arseniuro de hierro (FeAs), cada átomo de hierro (Fe) está rodeado de cuatro átomos de arsénico (As), dispuestos según los vértices de un tetraedro. Cuando el nivel de dopado es pobre y la temperatura baja, se distorsionan los tetraedros. Si la proporción de dopado corresponde a la máxima temperatura de transición (superconductividad), la distorsión desaparece; ello sugiere la importancia de una buena simetría tetragonal para la superconductividad del pnicturo. Simetría que no interviene en los planos de cupratos (CuO_2), que apenas muestran ligeros relieves.

En estado antiferromagnético, el cuprato constituye un aislante eléctrico; el pnicturo, en cambio, conduce, aunque menos que un metal típico. Para la entera comprensión de esos dos materiales habría que saber si es más importante su analogía en el antiferromagnetismo o su dispar conductividad en tal estado. Como en tantos otros casos, todavía no hay una respuesta firme.

Atrapar las ondas

La simetría de los pares de Cooper reviste suma importancia para desentrañar las causas de la superconductividad a altas temperaturas. En los materiales BCS, los pares de Cooper tienen simetría esférica, es decir, parecen iguales desde cualquier dirección. Llamada también simetría de onda *s*, recuerda la perfecta simetría esférica de un átomo de hidrógeno en su estado fundamental. (En ambos ejemplos, intervienen dos fermiones unidos entre sí: dos electrones en los pares de Cooper, un protón y un electrón en el caso de un átomo de hidrógeno.)

Se discutió durante largo tiempo el tipo de simetría que presentan los pares de Cooper en los cupratos; sólo tras muchos años de experimentos se llegó a la conclusión de que es una simetría de onda *d*, con una mezcla de onda *s*. La simetría de onda *d* recuerda un trébol de cuatro hojas, pero con dos colores de hoja (lóbulos “positivos” y “negativos”) alternadas en torno al tallo. Los primeros experimentos con pnicturos apuntaban a una simetría de onda *s*, dejando abierta la posibilidad de que estos materiales se comportaran, en algún aspecto, como superconductores BCS. Los resultados obtenidos en diciembre de 2008 y enero de este año demuestran, sin embargo, que la función de onda *s* del pnicturo posee una característica rara: las regiones positivas se hallan en el lado opuesto a las negativas, en vez de ser toda la esfera del mismo signo. De nuevo, pues, los pnicturos y los cupratos, aunque parecen semejantes, presentan diferencias.

Los estudios sobre pnicturos de hierro prosiguen a un ritmo frenético (tras 20 años de investigación en cupratos, se ha acumulado un verdadero arsenal de técnicas para acelerar el desarrollo de los nuevos materiales). Pero los resultados obtenidos hasta la fecha son tanto o más desconcertantes que los de los cupratos. Tal vez se tarde algún tiempo en aclarar el grado de relación entre ambos compuestos y las posibilidades que ofrecen sus rasgos coincidentes para el desarrollo de la superconductividad a temperatura ambiente.

Mientras tanto, Hosono, protagonista en el área, ha señalado otro fenómeno curioso que necesita explicación. En marzo de 2008, descubrió que el arseniuro de hierro y estroncio ($SrFe_2As_2$) superconduce no sólo cuando está dopado con cobalto, sino también cuando, sin dopar, se expone al vapor de agua. Por añadidura, las diferencias en las características de los dos casos le sugieren que en cada uno de ellos actúa un mecanismo de superconducción distinto.

Si la historia de los cupratos de algún modo sirve de guía, esperemos que durante varios años más los enigmas planteados superen en número a las respuestas.

PERSPECTIVAS DE FUTURO

A medida que se mejora el proceso de fabricación de hilos de cuprato, se amplía el campo de aplicación, todavía limitado, de estos materiales. Las empresas desarrollan sistemas de gran tamaño, como turbinas para aerogeneradores y motores de propulsión naval. En ambos casos producen potencias superiores en dispositivos de menor tamaño. Los físicos esperan que el estudio de los pnicturos dará paso a nuevos materiales, con temperaturas de transición superiores o mejores propiedades mecánicas que los cupratos.



TURBINA DE AEROGENERADOR

KEVIN HAND

Bibliografía complementaria

IRON-BASED LAYERED SUPERCONDUCTOR $LA[O_{1-X}F_X]FEAS$ (X = 0.05-0.12) WITH T_C = 26 K. Yoichi Kamihara, Takumi Watanabe, Masahiro Hirano y Hideo Hosono en *Journal of the American Chemical Society*, vol. 130, n.º 11, págs. 3296-3297; 19 de marzo, 2008.

CONDENSED MATTER PHYSICS: THE PNICTIDE CODE. Jan Zaanen en *Nature*, vol. 457, págs. 546-547; 29 de enero, 2009.

IRON ARSENIDE SUPERCONDUCTORS: WHAT IS THE GLUE? D. G. Hinks en *Nature Physics*, vol. 5, n.º 6, págs. 386-387; junio, 2009.

Convección de Bénard

Un sencillo experimento permite reproducir la convección que acontece en la superficie del Sol

Marc Boada Ferrer

Tres son los procesos de transferencia de calor: radiación (el calor que nos llega del Sol), transmisión (fenómeno que sucede cuando tocamos un metal frío que acaba por calentarse) y convección (movimiento que acontece en el seno de fluidos sometidos a diferencias de temperatura).

Un sencillo experimento nos servirá de ejemplo para la convección. Pongamos una sartén al fuego, como si fuéramos a freír un huevo. Vertamos algunas cucharadas soperas de aceite de oliva, que formen una película de un par de milímetros de espesor; la calentamos suavemente. Transcurridos algunos minutos, estudiemos la superficie de la capa de aceite.

Si observamos el reflejo de una lámpara, comprobaremos que su imagen aparece distorsionada, por la sencilla razón de que la superficie del aceite, lejos de ser plana, forma valles y montañas dispuestos con cierta regularidad. Un fenómeno que se debe a la aparición, en el seno del fluido, de celdas convectivas que transportan el calor suministrado a través de la base de la sartén hacia el aire situado sobre el aceite; el resultado es la homogenización de la temperatura del fluido.

En los albores de 1900, Henri Bénard llevó a cabo varios experimentos sobre un fenómeno que, en homenaje, lleva su nombre. Ahora lo reconocemos en la superficie del Sol, donde las células convectivas tienen unos 1000 kilómetros de diámetro; también nuestra litosfera está animada por movimientos convectivos que activan la tectónica de placas.

Volvamos al aceite de la sartén. Al encender el fuego, empieza a calentarse la capa inmediata a la base de la sartén. La capa inferior se dilata y, por tanto, se reduce su densidad; siendo más ligera que el resto del líquido, más frío, experimenta un empuje de Arquímedes (flotación), que la lleva hacia arriba, en contra del campo gravitatorio.

El ascenso de la capa límite inferior no se produce "en bloque". Cualquier inestabilidad, cualquier punto que se halle a una temperatura ligeramente superior induce al líquido a despegarse de la sartén y a subir, creando una pluma térmica. Al principio, ello ocurre en distintos puntos; el movimiento es turbulento. Pero conforme aumenta la temperatura, se establece un flujo convectivo que acaba por crear una pauta regular de celdas convectivas. Se obtiene, por fin, un patrón de Bénard [*véase* "Convección", por Manuel García Velarde y Christiane Normand; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1980].

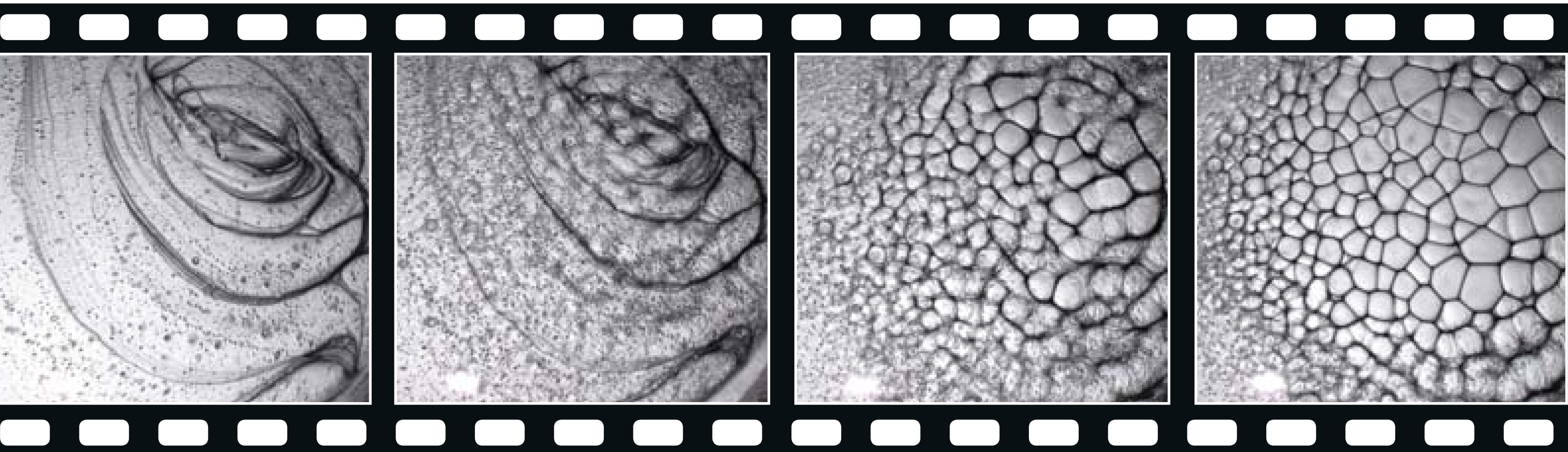
Para estudiar el fenómeno con mayor claridad se requiere la construcción de un dispositivo experimental. En primer lugar, buscaremos una placa calefactora cuya temperatura podamos controlar. En ausencia de un calefactor de laboratorio, nos servirá un hornillo eléctrico sobre el que instalaremos un bloque metálico de aluminio.

Practicaremos en la masa metálica un agujero profundo, por donde introduciremos la sonda de un termostato de circuito primario de calefacción por agua, que nos permita operar hasta unos 100 ºC. Agujero y sonda deben quedar bien ajustados para garantizar un contacto cabal y, por tanto, un mejor control de la temperatura. La placa metálica tiene por objeto crear una base de temperatura uniforme sobre la que colocaremos la cubeta con el fluido que queremos estudiar; la temperatura de la placa debe ser, por tanto, estable.

Obsérvese que, debido a la inercia térmica del hornillo, cuando el termostato detecta que la placa ha llegado a la temperatura de funcionamiento y desconecta la alimentación del horno, la temperatura sigue creciendo un poco. Ello se debe a una potencia de calefacción excesiva y al hecho de que, cuando la placa ha alcanzado la temperatura deseada, se requiere poca energía para mantenerla. Por tanto, quizá convenga ajustar la potencia de nuestro hornillo mediante un regulador eléctrico.

En mi taller utilizo un regulador eléctrico extraído de un sistema de iluminación halógena a 220 volt que soporta los

JORDI PRAT (*fotografías*)

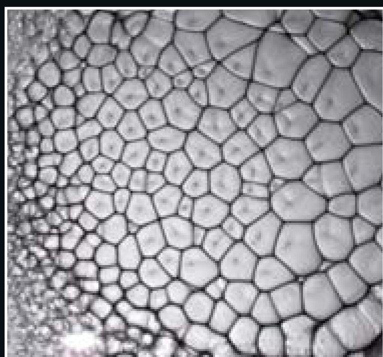


500 watt que disipa mi placa eléctrica. Así, cuando empiezo el experimento elevo la potencia al máximo y luego la voy reduciendo poco a poco, conforme el dispositivo se acerca a la temperatura de trabajo. (Puede recurrirse a termostatos proporcionales, que regulan de forma automática la potencia; pero aun sin éstos, el montaje que hemos descrito proporciona resultados excelentes en numerosos experimentos.)

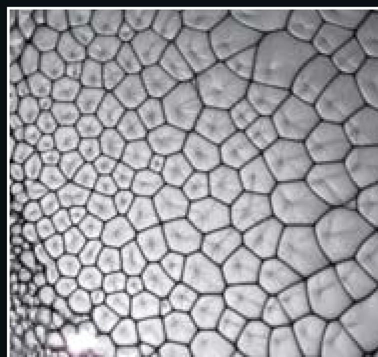
Centrémonos ahora en el recipiente donde vamos a crear la convección. Se abren muchas opciones, pues podemos optar por distintos flujos convectivos. Pero si queremos obtener el patrón de Bénard, debemos configurar un volumen de fluido de gran diámetro y poca altura (relación de aspecto pequeña). Construiremos una cubeta parecida a una placa de Petri, en aluminio. A partir de un disco de igual o menor tamaño que nuestra placa calefactora, tornearemos en su interior un hueco cilíndrico de unos 20 milímetros de profundidad, reservando para la base un espesor de 5 o más milímetros; las paredes pueden adelgazarse, con lo que se minimiza su temperatura.

En un dispositivo ideal, líquido y cubeta tendrían una extensión infinita para minimizar los efectos de la pared. Dado que ello resulta imposible, adoptaremos otras estrategias. Por ejemplo, introducir en el interior de la cubeta un anillo de material poco termoconductor. En función de la temperatura, utilizaremos un plástico u otro: por debajo de 80 ºC podemos usar metacrilato o PVC; a temperaturas superiores resulta óptimo el teflón.

Con la cubeta torneada, practicaremos varios agujeros en donde mediremos la temperatura local. Para esas mediciones usaremos un termopar con un sensor del mínimo tamaño posible. En mi cubeta





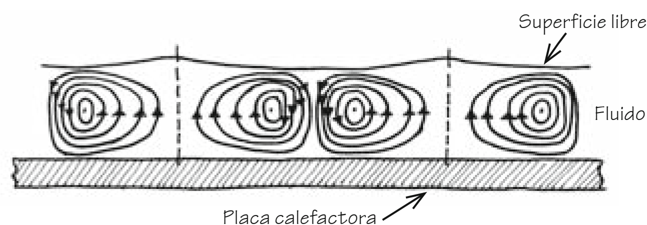


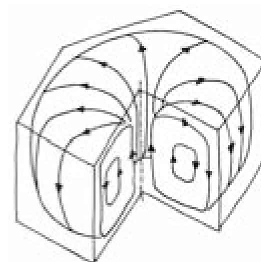
Secuencia fotográfica, con intervalos de 10 segundos, que muestra la aparición de la estructura de Bénard. El fluido corresponde a una capa de silicona de 2,5 milímetros de espesor y una viscosidad de 1000 centiStoke.

DINAMICA DE FLUIDOS

Las corrientes ascendentes y descendentes que se producen en un fluido calentado dependen de las complejas relaciones que operan entre la temperatura, la viscosidad, la tensión superficial y demás propiedades del fluido.

La variación de la tensión superficial a lo largo de la interfase altera la forma de la superficie y la estructura de la corriente convectiva. La tensión superficial aumenta cuando la temperatura disminuye. Por tanto, una diferencia de temperatura entre puntos de la superficie libre origina un gradiente de tensión superficial. El fluido es entonces arrastrado sobre la superficie hacia regiones más frías, de mayor tensión superficial, siendo reemplazado por fluido caliente que asciende desde estratos inferiores.





Debido al empuje de flotación, las celdas adoptan forma de rollo. En un recipiente rectangular, los rollos tienden a colocarse paralelos al lado menor; en un recipiente circular, forman roscos concéntricos.

mido la temperatura en el centro de la base, en un lateral y en la pared.

En cuanto al fluido donde nacerán las células convectivas, las posibilidades también son varias. Recordemos que, cuando un fluido se mueve, la aparición de turbulencias o de un flujo laminar depende de la velocidad y viscosidad del mismo: una velocidad reducida y una viscosidad elevada dificultan la generación de turbulencias. Por otro lado, la evaporación debe ser escasa y su estabilidad química garantizada.

En consecuencia, nuestra primera elección serán los aceites. Puede utilizarse aceite de oliva. Sin embargo, recomiendo un fluido de silicona, ya que su viscosidad varía poco con la temperatura, es transparente y resulta muy estable. Podemos usar fluidos en una amplia gama de viscosidades (de 100 a 2000 centiStoke), con resultados óptimos.

Para observar la formación y los patrones de convección emplearemos una fuente de luz puntual, un sistema colimador y un filtro espacial. Se aprovechan así las propiedades ópticas del fluido, en el que los índices de refracción dependen de la temperatura. Sin embargo, en una primera fase podemos optar por un método más sencillo, basado en la incorporación de alguna sustancia trazadora que nos marcará las líneas de corriente. Se obtiene un resultado excelente con polvo de aluminio, que dispersaremos poco a poco en el líquido. Las partículas se orientarán en la dirección del flujo; su distinta reflectividad, que varía con la posición, permitirá visualizar las celdas convectivas.

Para empezar el experimento, nivelaremos perfectamente el instrumento. Pondremos luego en el fondo de la cubeta una capa de 3 o 4 milímetros de la mixtura. Ajustaremos la temperatura del termostato a unos 50 grados por encima de la temperatura del aire, que intentaremos que permanezca estable, y conectaremos la alimentación eléctrica. Transcurridos pocos minutos, observaremos la afloración, aquí y allá, de un glóbulo de silicona caliente. Poco a poco, las surgencias se tornan filiformes, mudando luego en largos cilindros convectivos, irregulares.

Ajustaremos la potencia para calentar de forma gradual. Los cilindros se tornan progresivamente más irregulares y se rompen creando estructuras poligonales de pocos lados: triángulos, cuadrados y pentágonos.

Conforme avanza el proceso, desaparecen las células de mayor tamaño, se regularizan las dimensiones de las células y predominan las de seis lados. Aparece una estructura ordenada, hexagonal, donde antes no la había, una estructura que se mantiene gracias al aporte de energía (cuando éste cesa, desaparece la estructura).

El patrón de Bénard varía según el fluido (por la viscosidad característica) y según la razón de aspecto. El experimentador puede ensayar con cubetas altas con un diámetro y altura parecidos, y paredes transparentes para facilitar la observación por métodos ópticos del interior. También puede trabajar con fluidos confinados en un recipiente cerrado; mediante la regulación de la temperatura de la placa superior de cierre, se observa la aparición de la convección de Bénard en regímenes muy distintos.

Marc Boada es director de Pendulum Producciones Científicas

DESCRIPCION TEORICA

A John William Strutt, Lord Rayleigh, debemos el estudio teórico de los experimentos de Bénard; publicó sus trabajos sobre la convección en 1916.

En su primer modelo, Lord Rayleigh consideró que el fluido se hallaba confinado entre dos superficies de temperatura distinta. En esas condiciones, la viscosidad y, muy especialmente, la densidad y su fluctuación con la temperatura determinan el comportamiento del fluido. Las ecuaciones que describen el fenómeno muestran que la aparición de células convectivas depende del valor de ciertos parámetros adimensionales, como el número de Rayleigh (que relaciona los efectos disipativos en el seno del fluido y el empuje que experimenta) y el número de Prandtl (que relaciona la viscosidad y la difusividad térmica).

Por otro lado, el gradiente de la tensión superficial del líquido también desempeña una función notable, sobre todo en capas finas. Ello, junto con el comportamiento térmico de la cubeta y su razón de aspecto, añade complejidad a la descripción del sistema.

En función del régimen convectivo pueden obtenerse células convectivas de formas muy variables e incluso comportamientos caóticos.

Buenas noticias sobre el control de la malaria

Está comprobado que la mejor manera de que los pobres accedan a las mosquiteras es que sean gratuitas

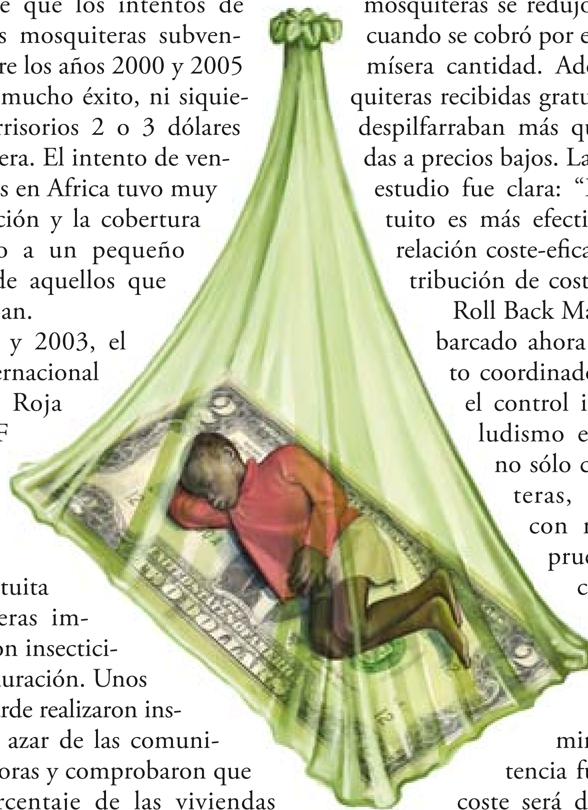
Jeffrey D. Sachs

Una cuestión frecuente sobre el desarrollo sostenible es cómo se puede ayudar a los más pobres del mundo. Sus ingresos son tan bajos, que carecen de acceso a los bienes y servicios imprescindibles: alimentación adecuada, agua potable, condiciones de salubridad y servicios médicos elementales. Una estrategia para ayudar a los pobres a cubrir estas necesidades, y puedan así escapar de la trampa de la pobreza, es proporcionarles apoyo económico. Mis colaboradores y yo hemos calculado que el coste de asegurar a los pobres del mundo la cobertura médica mínima para su supervivencia sería de alrededor del 0,1 por ciento del producto nacional bruto de los países de altos ingresos.

Un ejemplo de esta ayuda específica es la distribución masiva gratuita de mosquiteras contra el paludismo entre quienes viven en las regiones africanas más pobres y propensas a la enfermedad. La producción, transporte y distribución a una vivienda rural africana de cada una de estas mosquiteras impregnadas con insecticida de larga duración sólo cuesta alrededor de 10 dólares. Como estas redes duran cinco años y generalmente pueden dormir dos niños bajo una sola, el coste por niño es solamente de un dólar al año. Pero, a pesar del precio tan sorprendentemente bajo, algunos críticos se han opuesto a este método. Alegan que "se echarían a perder" gran cantidad de mosquiteras porque, al ser gratuitas, las desperdiciarían tanto los receptores como los diversos eslabones de la cadena de abastecimiento, ya que no las valorarían adecuadamente. La solución que prefieren estos críticos es sacarlas al mercado con descuentos; argumentan que pagar un precio, aunque sea bajo, haría que se utilizaran de forma más eficiente.

Los experimentos y la vida real han proporcionado pruebas que resuelven el debate de forma convincente: los elementos de juicio a favor de la distribución masiva gratuita de mosquiteras han resultado ser increíblemente poderosos. Durante muchos años, el uso de mosquiteras ha sido muy, muy escaso; sin embargo, ahora se está disparando y los casos de malaria están cayendo en picado allí donde las mosquiteras se distribuyen de forma masiva.

Así es como se han desarrollado los acontecimientos. Como los pobres del Africa rural son tan paupérrimos, no es sorprendente que los intentos de venderles las mosquiteras subvencionadas entre los años 2000 y 2005 no tuvieran mucho éxito, ni siquiera a unos irrisorios 2 o 3 dólares por mosquitera. El intento de vender las mallas en Africa tuvo muy poca aceptación y la cobertura alcanzó sólo a un pequeño porcentaje de aquellos que las necesitaban.



En 2002 y 2003, el Comité Internacional de la Cruz Roja y UNICEF probaron en algunos lugares la distribución masiva y gratuita de mosquiteras impregnadas con insecticida de larga duración. Unos meses más tarde realizaron inspecciones al azar de las comunidades receptoras y comprobaron que un alto porcentaje de las viviendas mantenía las mosquiteras. Al quedar de manifiesto la eficacia de la distribución masiva, la Organización Mundial de la Salud la adoptó como estrategia preferente en 2007. Un consorcio internacional, Roll Back Malaria, se fijó el objetivo de distribuir gratuitamente alrededor de 300 millones de mosquiteras de ese tipo en Africa durante el período 2008-2010, para que todos los hogares de las regiones de transmisión de malaria dispusiera de ellas. La cobertura ha saltado de aproximadamente 10 millones de mosquiteras en 2004 a 170 millones a finales de 2008.

Recientemente, el Laboratorio de Actuación contra la Pobreza del Instituto de Tecnología de Massachusetts llevó a cabo un elaborado experimento en el oeste de Kenia. Comparó allí el método de distribución masiva gratuita con el de subvención parcial: la adquisición de las mosquiteras se redujo drásticamente cuando se cobró por ellas incluso una mísera cantidad. Además, las mosquiteras recibidas gratuitamente no se despilfarraban más que las compradas a precios bajos. La conclusión del estudio fue clara: "El reparto gratuito es más efectivo, y mejor la relación coste-eficacia, que la distribución de coste compartido".

Roll Back Malaria se ha embarcado ahora en un proyecto coordinado para asegurar el control integral del paludismo en toda Africa, no sólo con las mosquiteras, sino también con medicamentos, pruebas diagnósticas rápidas y personal sanitario local con formación para administrar esta asistencia fundamental. El coste será de alrededor de 3000 millones de dólares anuales, o de 3 dólares anuales por cabeza, para los mil millones de personas que viven en los países de alto nivel de renta que donarían los fondos. Es hora de trasladar el éxito que ha demostrado la distribución masiva y gratuita a esa asistencia completa.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.

Viajes a través del tiempo

¿Qué nos enseña la ciencia ficción acerca del determinismo y el libre albedrío?

Agustín Rayo

De niño me encantaban las historias de viajes a través del tiempo. Una película que me impresionó especialmente fue *Back to the Future* [Regreso al futuro], con Michael J. Fox. Ahora sé, sin embargo, que la historia que se narra es inconsistente.

Al principio de la película, se nos dice que el 25 de octubre de 1985 nadie respeta a George McFly. Conforme avanza la película, se nos dice que Marty, el hijo de George, viaja en el tiempo a 1955 y conoce a su padre de joven. Gracias a la intervención de Marty, George logra conquistar sus miedos, y se convierte en un hombre audaz y valiente. Hacia el final de la película, se nos dice que Marty vuelve al 25 de octubre de 1985 (diez minutos antes de la hora en la que partió) y se encuentra con una situación muy diferente de la que se narraba al principio de la película: ahora George tiene una vida digna; todos le respetan.

No es difícil ver por qué esta historia es inconsistente. Al principio de la película se nos dice que en un cierto momento nadie respeta a George; al final de la película se nos dice que en ese mismo momento todos respetan a George. En otras palabras: lo que se declara al principio de la película contradice lo que se declara al final de la película. (Tal vez la mejor manera de pensar en esta película sería como si contara una historia de viajes entre mundos paralelos, en lugar de una historia de viajes a través del tiempo dentro de un mismo mundo. En ese caso no habría inconsistencia.)

Afortunadamente, no todas las historias de viajes a través del tiempo son inconsistentes. (Tanto la película *Twelve Monkeys* [Doce monos] como la película *The Time Traveler's Wife*, narran historias consistentes.) Para que una historia de viajes a través del tiempo sea consistente, lo que hace falta es que nunca se digan cosas diferentes acerca de un mismo momento en el tiempo. Si en algún punto de la historia se narra que el 25 de octubre de 1985 el mundo es de tal y cual manera, ése es un dato que debe respetarse durante toda la historia, independientemente de cómo se desarrolle la vida de los viajeros a través del tiempo.

La paradoja del abuelo

Una manera divertida de entender cómo funcionan las historias consistentes de



Bruno ha viajado a través del tiempo con la intención de asesinar a su abuelo. El año es 1937, mucho antes del nacimiento de los padres de Bruno. ¿Qué va a suceder? ¿Va a matar Bruno a su abuelo? Si la respuesta es 'no', ¿se sigue que Bruno carece de libre albedrío?

viajes a través del tiempo es considerando el caso de Bruno.

Bruno odia a su abuelo, y no sin razón. El abuelo fue un padre terrible: borracho, mujeriego y jugador. No sólo eso. Unos años después de que naciera la madre de Bruno, el abuelo orquestó un fraude a gran escala, que dejó en la pobreza a cientos de personas. Nada le gustaría más a Bruno que asesinar a su abuelo. Hay sólo un problema: el abuelo murió hace muchísimos años, mucho antes de que Bruno naciera. Pero Bruno sigue adelante con sus planes. Construye una máquina del tiempo y viaja a 1937, antes de que el abuelo tuviera hijos y antes de que orquestara el fraude.

Se acerca el momento de la verdad. Bruno está en un piso alto, con un rifle de francotirador. El rifle está cargado, y Bruno lleva años entrenándose para utilizarlo. El abuelo sale a hacer su paseo matinal. Bruno lo tiene en la mira. El abuelo se detiene a atarse los cordones de los zapatos. Bruno acaricia el gatillo. Está a punto de disparar... ¿Qué sucede?

Sabemos que el abuelo sobrevivirá. De lo que ya antes había sido dicho en la narrativa se sigue que el abuelo vivirá lo suficiente para tener hijos, y esto no puede suceder a menos que Bruno falle en su intento de asesinato de 1937, mucho antes de que los hijos hubieran nacido.

¿Por qué falla Bruno? Tal vez se arrepiente en el último momento; tal vez lo distrae el ladrido de un perro; tal vez se resbala en una piel de plátano; tal vez se le traba el gatillo. Eso no nos lo ha dicho la historia todavía. Lo que sí sabemos es que, siempre y cuando la historia sea consistente, nos dirá que el intento de asesinato falla de alguna manera.

Libre albedrío

A uno podría preocuparle que en la historia del abuelo Bruno tendría que carecer de libre albedrío. Eso sería un error.

Si la historia es consistente, tiene que decirnos que el intento de asesinar al abuelo va a fallar. Pero no tiene que decirnos que el intento *tiene* que fallar. Podría decirnos, por ejemplo, que la razón por la que el intento falla es que, ejercitando su libre albedrío, Bruno se decide en el último momento a no disparar. Nosotros —los lectores— sabemos que el intento va a fallar. Pero de eso no se sigue que Bruno no actuó libremente.

Aquí hay una comparación: un amigo nos cuenta que la noche anterior intentó suicidarse. Nosotros —los que escuchamos la historia— sabemos que el suicidio no ocurrió (¡ahí está nuestro amigo contándonos la historia!) Pero de eso no se sigue que el amigo no haya actuado libremente, o que el intento de suicidio *tenía* que fallar.

En ambos casos, disponemos de información acerca del futuro: sabemos que el abuelo vive para dejar descendencia y que el amigo vive para contar su intento de suicidio. Esto hace que haya un sentido de 'tener' en el que nosotros —los que escuchamos las historias— podríamos decir que los intentos "tenían" que fallar, a saber: que los intentos sean exitosos es inconsistente con lo que sabemos acerca del futuro. Pero este no es el sentido de "tener" que importa en el problema del libre albedrío. Lo que importa para el libre albedrío es que exista la posibilidad de éxito, independientemente de si tal posibilidad sea una que estemos en posición de excluir nosotros, que poseemos información acerca del futuro.

Leyes naturales

Imaginemos lo que bien podría ser falso: que las leyes de la física son deterministas. Imaginemos, en otras palabras, que dada una descripción completa del estado del universo en un cierto momento, las leyes nos permiten deducir una descripción completa del estado del universo en cualquier momento posterior.

¿Sería esto incompatible con el libre albedrío? De acuerdo con una cierta manera de entender las leyes naturales —la manera que a mí me parece correcta—, la respuesta es ciertamente "no". Las leyes nos dicen cómo va a desarrollarse el mundo, de hecho, a través del tiempo. Pero no nos dicen que el mundo *tiene* que desarrollarse de esa manera.

La situación es análoga a las de los casos de Bruno y el amigo con tendencias suicidas. Supongamos que conozco las condiciones iniciales del universo y que las leyes naturales me permiten determinar que Susana levantará el brazo derecho el 7 de octubre del 2019, a las 11:41:23 am (CEST). Esto me da información acerca del futuro. Hay, por tanto, un sentido de "tener" en el que yo, que conozco las leyes, podría decir que Susana "tiene" que levantar el brazo. A saber: que Susana no levante el brazo es inconsistente con lo que las leyes me dicen acerca del futuro. Pero este no es el sentido de "tener" que importa en el problema del libre albedrío. Lo que importa para el libre albedrío es que exista la posibilidad de que Susana no levante el brazo, independientemente de si esta posibilidad sea una que esté en posición de excluir alguien que posea información acerca del futuro.

Conocer las leyes naturales es como contar con un amigo capaz de viajar en el tiempo. El amigo nos daría información acerca del futuro relatando sus aventuras a través del tiempo. Las leyes naturales nos dan información acerca del futuro utilizando la información que poseemos acerca del pasado y el presente. Pero en ambos casos la información es sólo información sobre cómo será el futuro de hecho, no información sobre cómo *tiene* que ser el futuro.

Hay quien no estaría contento con esta manera de pensar en las leyes naturales. De acuerdo con la posición rival, las leyes no se limitan a darnos información sobre cómo es el mundo de hecho (y cómo hubiera sido el mundo si las condiciones iniciales hubieran sido diferentes). Nos dan, además, información acerca de qué es posible y qué imposible: nos dicen no sólo que un mundo con tales y cuales condiciones iniciales se desarrollará de tal y cual manera, sino también que *no es posible* que dicho mundo se desarrolle de otra manera. Hasta donde puedo ver, no hay ninguna razón científica para pensar que las leyes poseen esa función adicional.

Agustín Rayo es profesor de filosofía en el Instituto de Tecnología de Massachusetts.

¿Quiere saber más?

Pocos han hecho tanto por elucidar estos temas como David Lewis, profesor de filosofía de la Universidad de Princeton hasta su prematura muerte en el 2001. Si quiere saber más sobre la paradoja del abuelo recomiendo: 'The Paradoxes of Time Travel', por D. Lewis.

Si quiere saber más sobre determinismo y libre albedrío recomiendo: "Are We Free to Break the Laws?", por D. Lewis.

Ambos artículos están reimpresos en *Philosophical Papers* (volumen 2). D. Lewis. Oxford University Press, 1986.

El blog <http://gfp.typepad.com/> está dedicado a discusiones sobre libre albedrío.

Cánulas vasculares

Stents

Mark Fischetti

El implante de endoprótesis vasculares que ensanchan las arterias atoradas (*stents*) crece a tal rapidez, que algunos médicos afirman que se está abusando de ellos. Sus defensores señalan que estos insertos llevan más de 20 años evolucionando y representan una alternativa a una cirugía abierta, más invasiva.

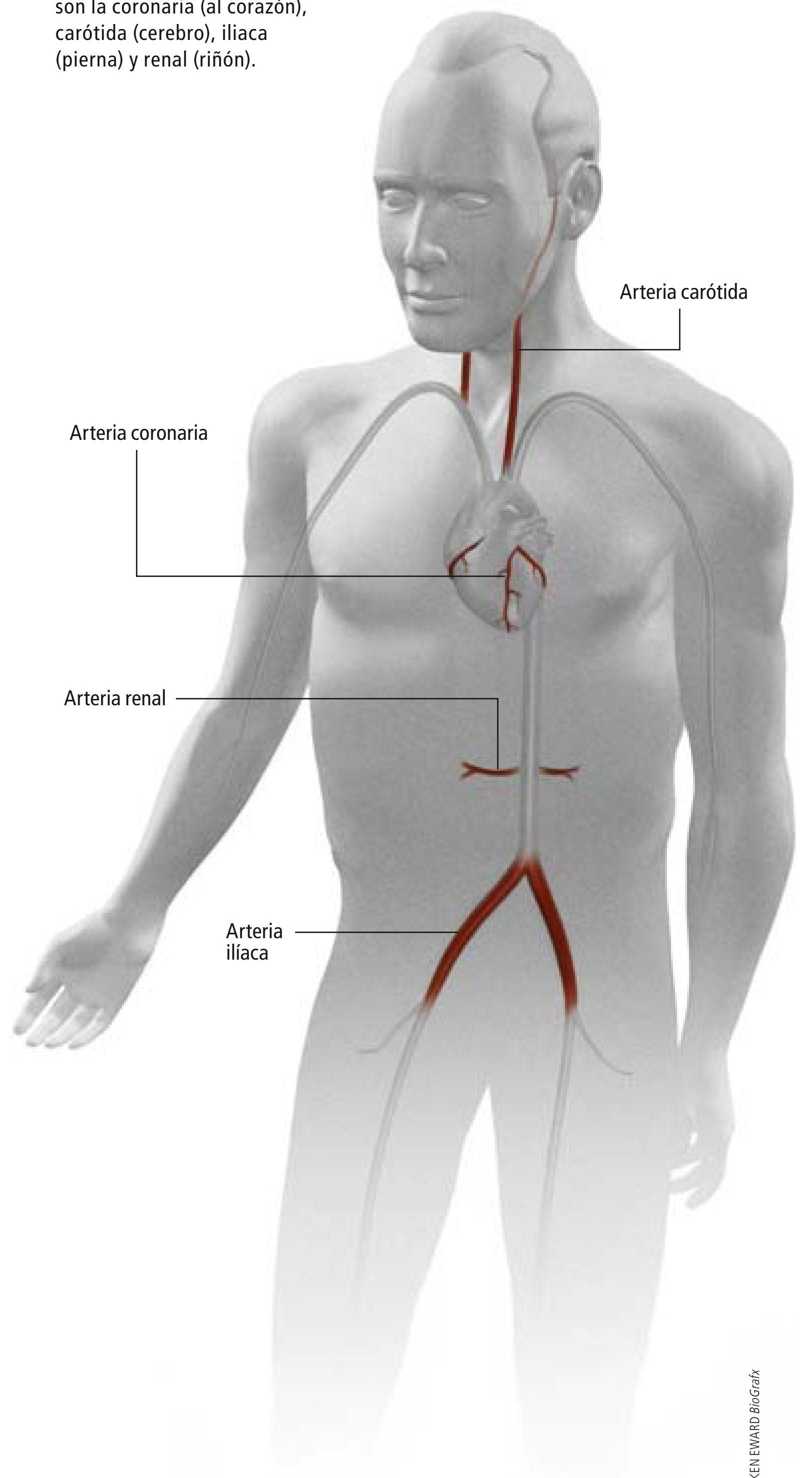
Durante decenios, a los pacientes de coronarias cuyas arterias se habían estrechado a causa de la formación de placas se les practicaba una intervención a corazón abierto; entre los extremos del vaso en peligro se cosía una derivación formada por un trozo de arteria o vena sana. Con los pacientes que tenían alguna arteria obstruida en otro lugar, las medidas eran similares, o bien se abría quirúrgicamente la arteria para eliminar la placa mediante rascado. La aparición de la angioplastia con globo redujo la intrusividad para ciertos casos; mediante un catéter se llevaba hasta la obstrucción un globo, que luego se inflaba para romper y comprimir la placa, lo que ensanchaba el paso del flujo sanguíneo. Pero muchas veces las arterias volvían a estrecharse si las paredes retrocedían o se formaban tejidos fibrosos.

Los *stents* se colocan mediante un proceso neumático similar, pero mantienen la arteria siempre abierta. Se aplican sobre todo a las arterias coronarias que alimentan al músculo cardíaco, pero otros vasos están recibiendo cada vez más atención.

Los primeros *stents*, aprobados a principios de los años noventa, eran de acero inoxidable. Luego aparecieron las versiones autoexpansibles de aleación de níquel-titanio con "memoria de forma". En EE.UU. se aprobaron en 2003 los *stents* recubiertos de polímeros que liberan fármacos para impedir el crecimiento de tejidos. Según los críticos, los médicos subestiman los riesgos quirúrgicos y se precipitan en su uso. Pero en la opinión de Michael Jaff, director médico del Centro Vascular del Hospital General de Massachusetts, los *stents* coronarios han revolucionado el cuidado del paciente. Aunque el 30 por ciento de los pacientes cardíacos sufren de estenosis recidiva con los *stents* comunes, con *stents* medicados esa tasa se reduce a menos del 10 por ciento. Jaff resalta que la superioridad de los *stents* medicados está avalada por fundamentos científicos sólidos. Para otras aplicaciones, los *stents* siguen pareciendo ventajosos, pero hay menos datos que lo demuestren.

Los fabricantes están avanzando a toda marcha. Brian Firth, vicepresidente médico en Cordis Corporation, dice que su empresa está desarrollando *stents* para la arteria superficial femoral del muslo y la arteria poplítea de la rodilla. En su opinión, los *stents* están en alza y es probable que siga esa tendencia.

1. LAS ARTERIAS donde suelen implantarse *stents* son la coronaria (al corazón), carótida (cerebro), iliaca (pierna) y renal (riñón).



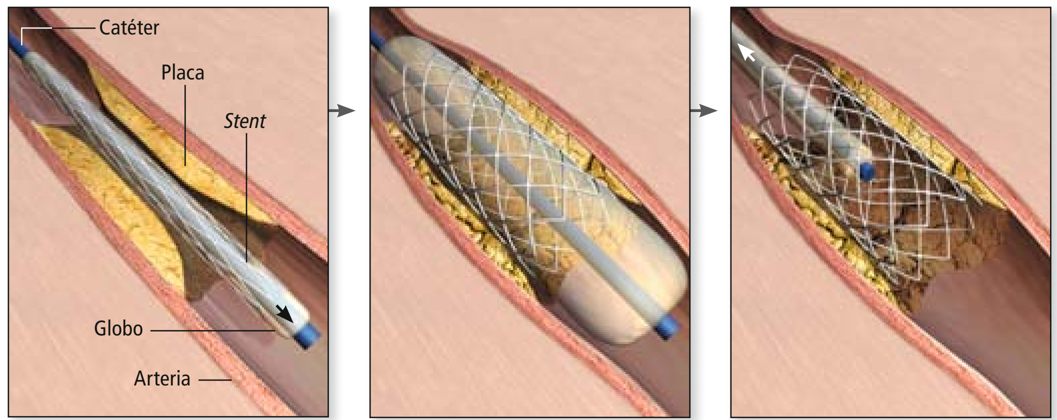
¿SABIA USTED QUE...?

➤ **CAPTADOR DE PLACAS:** Los *stents* fracturan las placas, que podrían soltar pequeños residuos. Estos son tolerados con pocos efectos clínicos por la mayoría de los órganos, según L. Nelson Hopkins, director del departamento de neurocirugía de la Universidad estatal de Nueva York en Búfalo. Pero los residuos que se alojen en una arteria que vaya al cerebro pueden producir un trombo. Por consiguiente, varias compañías han ideado filtros retenedores de placa para los implantes de *stents* de carótida. En algunos casos, se emplean globos para cortar el flujo sanguíneo durante la intervención; unos catéteres de succión eliminan los residuos antes de restaurar el flujo normal.

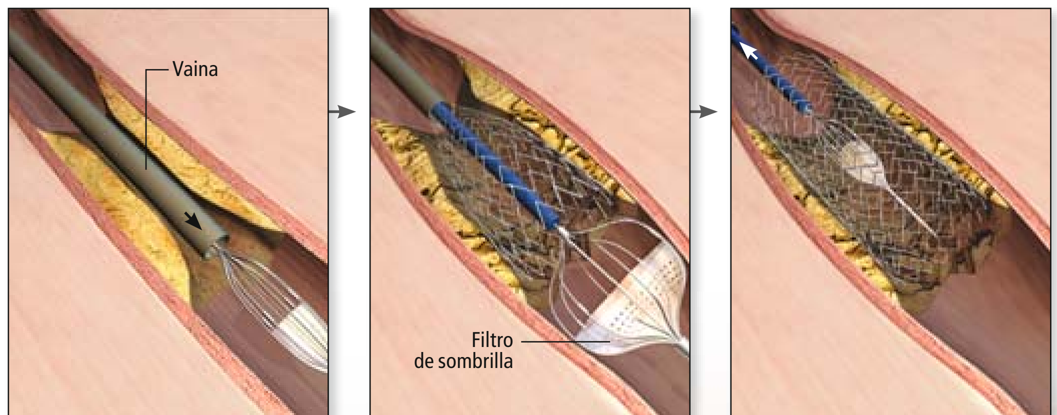
➤ **COAGULOS NO:** En torno a cualquier lugar intervenido quirúrgicamente o a un implante pueden formarse coágulos sanguíneos. Los pacientes con endoprótesis vasculares suelen tomar un medicamento que impide la coagulación de las plaquetas, durante un mes a un año, y aspirina, el fármaco más antiplaqueta de todos.

➤ **NADA DE TALLA UNICA:** Los *stents* se dimensionan esmeradamente a la medida de la arteria enferma del paciente, primero mediante formación de imágenes y luego durante la intervención. La mayoría de las arterias coronarias tienen de dos a cuatro milímetros de diámetro; las carótidas, de cuatro a seis milímetros. Para las coronarias se prefieren los *stents* de expansión neumática porque el globo permite ajustar con precisión el ancho final. Los *stents* autoexpansibles resisten mejor al aplastamiento; por ello se prefieren para implantes en la carótida, ya que esas arterias se hallan cerca de la piel, donde un *stent* normal podría verse peligrosamente estrechado por las presiones exteriores.

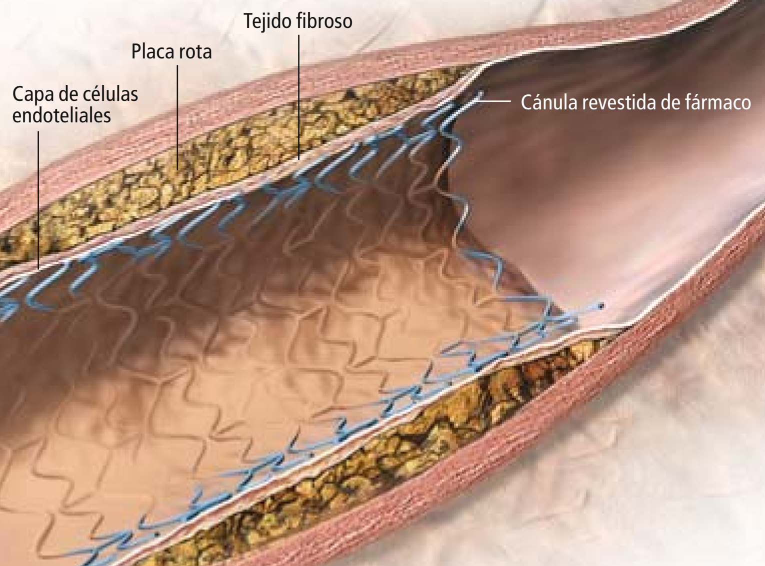
2. LOS *STENTS* DE GLOBO EXPANDIBLE, empleados en la mayoría de las arterias coronarias, se montan sobre un globo; un catéter lleva el conjunto al lugar de implante. Se infla entonces el globo (quizá varias veces) para abrir la cánula; la placa se comprime y se rompe. Seguidamente se desinfla y se retira el globo.

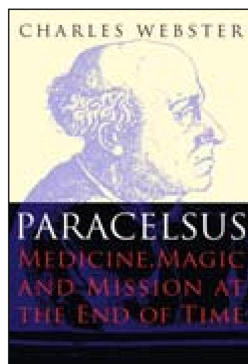


3. LOS *STENTS* AUTOEXPANSIBLES se emplean en la mayoría de las intervenciones en la carótida. El *stent* se halla comprimido en el interior de una vaina dura. Al retirarse ésta, se expande el *stent*. Puede que luego se aplique un globo para que el *stent* y la placa queden mejor engastados. Durante el implante puede emplearse un filtro de sombrilla para recoger los pequeños fragmentos que pudieran desprenderse de la placa y taponar el paso de una arteria al cerebro causando un trombo.



4. UNA PLACA ROTA desencadena una reacción cicatrizante que podría estrechar el paso. Las cánulas liberadoras de fármacos están revestidas de un polímero que, a lo largo de varias semanas, libera un medicamento que impide la formación de tejido fibroso nuevo, si bien permite el crecimiento de las células endoteliales que normalmente revisten el vaso. Por fin, las células cubren la malla, lo que reduce la posibilidad de que coagulen sobre ella plaquetas sanguíneas y se cree una obstrucción.





PARACELSUS. MEDICINE, MAGIC AND MISION AT THE END OF TIME,

por Charles Webster. Yale University Press; New Haven, 2008.



DIEGO DE ZUÑIGA. FISICA.

Edición de Gerardo Bolado. Eunsa; Pamplona, 2009.

Vísperas galileanas

La pérdida de la seguridad aristotélica y galénica

Nadie personifica mejor la dureza de la primera mitad del siglo xvi, con sus revoluciones religiosas, sociales y científicas, que Theophrastus von Hohenheim (1493-1541), Paracelso. Cincuenta años después de la obra clásica e insuperada de Walter Pagel, nos encontramos con esta otra de Charles Webster —*Paracelsus. Medicine, Magic and Mision at the End of Time*—, anunciada como su autorizado relevo. El autor ha podido acceder a fuentes inéditas, ha profundizado en los escritos teológicos y contado con ediciones críticas de distintos escritos paracelsistas. Apoyándose en ese nuevo material, nos pergeña un retrato más acabado del Paracelso real, el humillado, alquimista y subversivo.

El marco corresponde a una edad y un espacio preñados de oportunidades. La economía se desarrolló y la cultura floreció en las naciones de habla alemana. El propio Paracelso conoció de primera mano el despegue de la metalurgia y la nueva industria de la edición. En su praxis médica no dudó en recurrir a la creciente farmacopea que se ampliaba con remedios venidos del nuevo Mundo y de Asia. En numerosas ocasiones se vio beneficiado —tantas como le engañaron— con el patronazgo de familias enriquecidas al socaire del nuevo orden económico. Las ciudades que hilvanaron su carrera profesional, Ausgburgo, Basilea, Núremberg y Estrasburgo, explotaron las manufacturas tradicionales y desarrollaron la industria y el comercio. Supieron sacarle partido a las habilidades de los profesionales, fomentaron las artes y los oficios y emergieron como centros cosmopolitas.

La ciencia septentrional avanzó con la estrecha colaboración entre médicos humanistas y artistas. Entre 1530 y 1558 aparecieron los herbarios de Otto Brunfels y Leonhart Fuchs, las anatomías ilustradas inspiradas en la canónica de Andrés Vesalio, los tratados naturalistas de Konrad Gessner y la revisión metalúrgica de Georgius Agrícola. Vesalio había enseñado en la Universidad de Padua y luego se convirtió en médico de Carlos V y de Felipe II. Tras varios años de docencia en la Universidad de Lausana, Gessner fue elegido médico municipal de Zúrich. También Agricola fue médico de St. Joachimsthal y de Chemnitz. La medicina constituía, en efecto, una profesión con la que hasta los practicantes más humildes podían aspirar a una subsistencia decorosa y estable. El padre de Paracelso, Wilhelm Bombat von Hohenheim, se quedó en médico de pueblo, de Villach, en Carintia. Wilhelm pertenecía a una familia que había estado al servicio de la abadía benedictina de Einsiedeln, en el cantón suizo de Schwyz, donde nació Paracelso.

No existe documentación fiable sobre la educación académica, si la tuvo, de Paracelso, por más que declarara que se había formado en la Universidad de Ferrara. Desconocemos también sus primeros pasos en el ejercicio. Lo mismo que sucedía con tantos otros en su tiempo, es verosímil que ganara predicamento como cirujano militar. Las actividades del joven Paracelso antes de 1525, el período de Salzburgo, pertenecen al terreno de la conjetura. Su propio testimonio habla de viajes por toda Europa, costumbre asentada en medios intelectualmente inquietos, con particular afición al llamado *iter italicum*, o camino hacia las universidades peninsulares. En esos caminos conocerá la fuerza terapéutica de las aguas minerales y los manantiales. Anduvo por Lituania, Prusia, Polonia y los Países Bajos.

A finales de verano de 1526, a raíz de un fallido tratamiento de un trastorno gastrointestinal del margrave Felipe I de Baden, Paracelso fue convocado a palacio; acertó en la terapia administrada, pero no recibió el estipendio esperado. Frustraciones que se repetirían y que él atribuía a los celos de los médicos locales, meros charlatanes en su opinión. No guardaba un juicio más condescendiente para las universidades, a las que negaba capacidad para enseñar teología. Por su parte, decidió seguir el ejemplo de los apóstoles y apoyarse sólo en las enseñanzas de Cristo. Abanderó una crítica vitriólica contra la Iglesia Católica. A Estrasburgo llegó en el otoño de 1526. La ciudad se caracterizaba por su tolerancia y así paseaban por sus calles inconformistas de toda condición. El éxito profesional que allí obtuvo le abrió las puertas de Basilea, con la intervención directa del editor Frobenius para ocupar el puesto de médico de la municipalidad.

Tampoco en Basilea le acompañó la fortuna. En los meses de verano de 1527 y 1528, se clavaron en los portalones de los edificios públicos unos versos críticos contra él. Hubo, además, un miembro eminente del capítulo catedralicio, entregado ya a la Reforma, que rechazó pagarle la asistencia médica. Cuando apeló al resto de los capitulares pidiendo amparo, le dieron la espalda. Paracelso abandonó su cargo municipal, presto a recomponer su fama. Se encaminó hacia Núremberg. Decidió probar suerte con la pluma. Y empezó a escribir sobre la sífilis. Lo hizo en un tono tal, que sus oponentes impidieran la impresión. A comienzos de 1531, cuando el hambre apretaba, se marchó a St. Gallen, como médico del burgomaestre Christian Studer. Una breve estancia posterior en Ausburgo le permitió la publicación de su *Grosse Wundarznei*, la única obra médica de Paracelso aparecida en vida. Se trataba de un tratado de

cirugía que coronaba una larga tradición germana sobre la materia.

Carintia fue el punto final de su trayectoria, donde pasó dos años. En Carintia progresó sustancialmente en la redacción de su ambiciosa *Astronomia magna* y pergeñó los *Kärntner Schriften*. Murió en Salzburgo, en septiembre de 1541, a la edad de 48 años.

Tras su muerte, sus contrarios demonizaron su memoria; cundió la especie de que se había entregado a la magia negra. Sus defensores se concentraron en la recuperación de sus manuscriutos y en su impresión. Pese a poderosas obstrucciones iniciales, desde 1560 los seguidores de Paracelso, comandados por Adam Bodenstein, llevaron sus manuscritos a la imprenta. Karl Sudhoff, en su bibliografía paracelsista, puso de relieve el alcance de esa tarea: la lista comprendía no menos de 345 ediciones publicadas entre 1560 y 1568. Los estudios ulteriores fueron añadiendo sectores geográficos a tan formidable cifra.

Paracelso, que en opinión de Oporinus había adoptado con respecto a la Iglesia y a la medicina un mismo enfoque (independencia y crítica absolutas) se mostró familiarizado con la alquimia medieval. Concedió importancia primordial a las artes químicas. Compaginaba su admiración por la alquimia de Hermes Trismegisto con su condena por haber vinculado la medicina a la falacia de los cuatro humores y por su teoría química de que los metales procedían del mercurio y del azufre. Uno de sus conceptos fundamentales era el de regeneración o renovación, por las que el hombre volvería a ser dueño de la creación a través de las ciencias, las artes y la medicina. Tres eran los componentes del hombre: alma, espíritu y cuerpo. Tres eran también los pilares del conocimiento de la medicina: la filosofía natural, la astronomía y la alquimia. Tres las dimensiones que condicionaban el conocimiento: los cielos, la esfera terrestre y el microcosmos humano. Toda la materia creada del universo derivaba de un triple principio: mercurio, azufre y sal, lo mismo se hablara del cuerpo humano, que de los metales o los cuerpos del firmamento. La primera exposición detallada de su teoría de los tres principios la leemos en el *Opus paramirum*, escrita en torno a 1530.

Al explayarse sobre las limitaciones de la teoría de los cuatro elementos, los contrapuso al avance de la química, que explicaba cómo los metales podían dar cuenta de la diversidad de compuestos hallados en la naturaleza mediante manipulaciones muy sencillas. Sea por caso uno de sus principios fundamentales, el plomo, que adquiría distintas propiedades físicas o químicas según se encontrara en forma de minio, albayalde, etcétera; en el primer caso era rojo (óxido de plomo); en el segundo era blanco (carbonato de plomo). Una dimensión importante de la teoría de los tres principios fue su aplicación a la descripción de los fenómenos naturales en todos los niveles del cosmos. Esa concepción unificada del cosmos era esencial para Paracelso, porque la teoría de la enfermedad, lo mismo que cualesquiera otras teorías suyas, implicaba un intenso comercio entre el firmamento y el hombre. Con todo, empleó una interpretación personal libérrima de los vínculos clásicos entre el microcosmos y el macrocosmos.

Fue uno de los primeros en ocuparse de las enfermedades profesionales y reconoció la silicosis como un riesgo que corrían los mineros. Supo ver la relación entre el bocio y el cretinismo. Introdujo la morfina, el azufre y el plomo en la praxis médica, así como el mercurio para el tratamiento de la sífilis. Dio buenas descripciones de ciertas patologías mentales, que él reputaba enfermedades y no posesiones diabólicas. Sin embargo, defendió la posibilidad de crear vida humana en el laboratorio y dictó instrucciones para lograrlo mediante la fermentación de una muestra de semen.

Pasaban los decenios, pero el aristotelismo, lo mismo que el galenismo, se resistía también a desaparecer. Diego de Zúñiga (1536-1598) diseñó un ambicioso proyecto de reforma general del saber (*De optimo genere totius philosophiae tradendae et Sacrosanctae Scripturae explicandae* [1568]), del que sólo publicó la primera parte, su *Philosophiae prima pars* (Toledo, 1597), a la que pertenece la *Física*. De enorme interés sus *In Job Commentaria*, donde defendía la compatibilidad de las tesis copernicanas con la Biblia.

Las cuestiones abordadas en la *Física,* acordes con el patrón aristotélico, se enriquecen con interpolaciones o inclusiones de autoridades escolásticas. La explicación del movimiento de caída de los graves se sirve de los teóricos del ímpetus. Al hablar de los elementos, autoridades son Galeno, de la antigüedad, y Fernel, entre los contemporáneos. Sobre la situación de la Tierra en el cosmos, el contrincante es Copérnico. Su independencia de criterio sobresale en el desarrollo de todas las cuestiones, aunque no deja de mirar a los trabajos precedentes del dominico Soto y del jesuita Toledo.

En el Renacimiento, la física, o filosofía natural, constituía una materia obligada, y central, en las facultades de artes. Se impartían tomando por plantilla la exposición y comentario de las obras de Aristóteles dedicadas al estudio de la naturaleza. Los nominalistas de París y los calculadores ingleses favorecieron la renovación de la disciplina en puntos centrales como el del movimiento, el vacío o la extensión. También se adivinaba una corriente epistemológica innovadora. El divino Valles y Villalpando, por ejemplo, consideraban sólo probable el conocimiento del mundo físico. Zúñiga se mantiene aristotélico y le reconoce un carácter universal y necesario, propio de la ciencia cierta. Su método, dialéctico, parte de la experiencia observacional.

Los tres primeros libros de la *Física* de Zúñiga resumen ocho de la obra homónima aristotélica. El resto se construye también sobre bases aristotélicas. Así, tomado del tratado *Sobre el cielo* es el libro cuarto. El quinto sintetiza la teoría aristotélica del cambio (*Sobre la generación y corrupción*). Los libros seis, siete y ocho recogen la doctrina de los *Meteorológicos*; el nono y el décimo versan en torno a los problemas abordados en los tres libros *Sobre el alma*. Por fin, el undécimo se sustenta en los *Parva naturalia*. Acude a Galeno para vertebrar la tesis de los principios de la materia, los cuatro elementos. Juan Filopón le orienta en la teoría del ímpetus. Pese a la mala fama que han cobrado por entonces los árabes, no duda en traer a colación comentarios de Avicena y Averroes. Cita a Ali Aben Ragel y Abumasar en la interpretación de la nova de 1572. Por supuesto, a la hora de repasar tesis más especulativas, no duda en acudir a los grandes filósofos de la Escolástica bajomedieval. Pero resulta significativo el uso de lo que pudiéramos llamar la nueva física que arranca de los perspectivistas. Vitelio es un caso paradigmático. Otro, el *De revolutionibus*, de Copérnico, aunque la relación con éste es todavía fluctuante. Vía Soto conoce la corriente matematizadora de la física que se ha asentado en el París nominalista. Desdeña, sin embargo, la historia natural, que le parece más cercana a la casuística que a una ciencia fundada

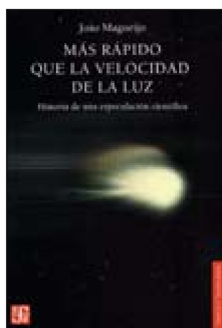
sobre conceptos universales. Y se mece en la doctrina tradicional de la subordinación de las ciencias.

Siguiendo a Aristóteles, Zúñiga distingue entre la materia prima y la materia concreta de las sustancias. Los elementos integran la materia concreta, no la materia prima, que vendría a ser una suerte de substrato común. En la misma onda hilemórfica se instala a propósito del tiempo, medida del movimiento, y del espacio o lugar, caracterizado por la capacidad para contener en sí móviles. En cambio, el vacío es el lugar sin móvil, el receptáculo sin magnitud. Aunque la naturaleza aborrece el vacío, Zúñiga acepta como posible el movimiento local en el vacío.

Punto importante en la física del momento es el de la caída de los graves. En el esquema aristotélico, el móvil aumenta su velocidad de caída a medida que se acerca a su lugar natural. Zúñiga concibe la gravedad como una capacidad natural del grave y admite que los graves aumentan su velocidad a medida que se alejan del punto inicial del movimiento. Se sitúa, pues, en el marco de la teoría del ímpetus. La explicación del fenómeno de caída no sólo incluye el principio de conservación del movimiento, sino también la acción eficiente de la gravedad o capacidad natural del grave que tiende a caer verticalmente hacia el centro de la Tierra. En línea con Buridan y Nicolás de Oresme, defensores de la conservación del ímpetus, explica el movimiento de los cielos a partir de cuatro principios: la inmutabilidad de los cielos; existencia del movimiento de las esferas desde el instante de la creación; el movimiento es causa de movimiento, y el estado natural de los cielos es el movimiento.

Con el problema de los graves, otra cuestión bastante novedosa concernía al movimiento de los proyectiles, de difícil explicación en el marco de la mecánica aristotélica. El movimiento impreso en el proyectil se conserva. Sin embargo, desde que el proyectil sale disparado, sufre la acción constante de su gravedad, de la tendencia de su naturaleza a la caída rectilínea, que lo debilita hasta hacerlo caer. Mientras el movimiento violento del grave lanzado sea más fuerte que su movimiento natural rectilíneo de caída, el proyectil seguirá con su movimiento. Sin embargo, por la eficiencia constante de su naturaleza, es inevitable su debilitamiento constante, su agotamiento y su caída final.

Luis Alonso



MAS RAPIDO QUE LA VELOCIDAD DE LA LUZ. HISTORIA DE UNA ESPECULACION CIENTIFICA,

por João Magueijo. Fondo de Cultura Económica; Buenos Aires, 2006.

Luz de velocidad variable

Especulaciones cosmológicas

Cien años atrás, Albert Einstein sorprendía a sus colegas con una idea extraña y original. La luz —afirmaba— se propaga a idéntica velocidad para todo observador, independientemente del estado de movimiento de este último. Además, la velocidad de la luz debe ser una constante de la naturaleza.

Pero pasaron muchas décadas y lentamente se vio que la cosmología surgida a partir de la teoría de Einstein no podía dar cuenta de todo. Durante los primeros instantes de la vida de nuestro universo, la teoría debía complementarse con nuevos elementos para explicar las cada vez más rigurosas observaciones astrofísicas.

El libro de Magueijo propone una idea novedosa y que requeriría una extensión nada trivial de la relatividad: la posibilidad de que la luz no siempre se haya propagado con igual velocidad. El autor muestra los puntos a favor y en contra de su tesis.

João Magueijo, joven profesor de física teórica del Colegio Imperial de Londres, explica con ejemplos simples y cotidianos los elementos básicos de las teorías de la relatividad de Einstein: la teoría restringida y la general.

Explica las ideas más novedosas sobre el origen de la "energía oscura" y cómo su presencia permite dar sentido a las observaciones astrofísicas. Pasa revista a la teoría de la "inflación cósmica", ese período de expansión ultrarrápida que acontece en las primeras fracciones de segundo de la vida de nuestro universo. La inflación resuelve varios de los grandes problemas de la gran explosión. En particular, permite abordar el problema de los horizontes: ¿Por qué nuestro universo, a muy grandes escalas, se nos muestra tan uniforme en todas las direcciones en que lo observamos? Debido a la velocidad finita de la luz, en el universo existe una infinidad de regiones que jamás deberían haber estado en contacto causal, ni entre ellas ni con nosotros. Sin embargo, al recibir la luz de regiones del espacio ubicadas en direcciones diametralmente opuestas, las vemos con propiedades muy similares. La inflación resuelve ese enigma, proponiendo que todo lo que nos rodea surgió de un pequeño volumen que alguna vez se expandió en forma descomunal. Dentro de ese volumen, todas las regiones que luego devendrían las que hoy observamos en el cielo, habrían tenido el tiempo de uniformizarse.

Pero Magueijo se pregunta: "¿Y si en el universo primigenio la velocidad de la luz hubiera sido mayor que la actual?" Supongamos que el universo tiene un año de edad y que, antes del año, la luz tenía una velocidad mucho mayor que posteriormente (era una "luz veloz"). ¿Cuál es, entonces, el radio de la región causal? Aproximadamente un "año-luz-veloz", mucho mayor que un año-luz habitual. Y si ese año-luz-veloz resultara ser mayor que el tamaño del universo que hoy observásemos, el problema de los horizontes quedaría resuelto sin tener que recurrir a la inflación.

En esta "teoría de la velocidad variable de la luz" se resuelven varios problemas de los modelos cosmológicos y se abren las puertas a toda una variedad de efectos nuevos y, aunque especulativos, sumamente interesantes. Mezclando argumentos lúcidos con anécdotas y experiencias personales, sin olvidar las críticas ácidas a varios miembros de las cúpulas científicas, la obra de Magueijo nos pasea por los temas más avanzados de la cosmología, de la teoría M y las dimensiones suplementarias, sin olvidar los agujeros negros y hasta los rayos cósmicos de ultraalta energía.

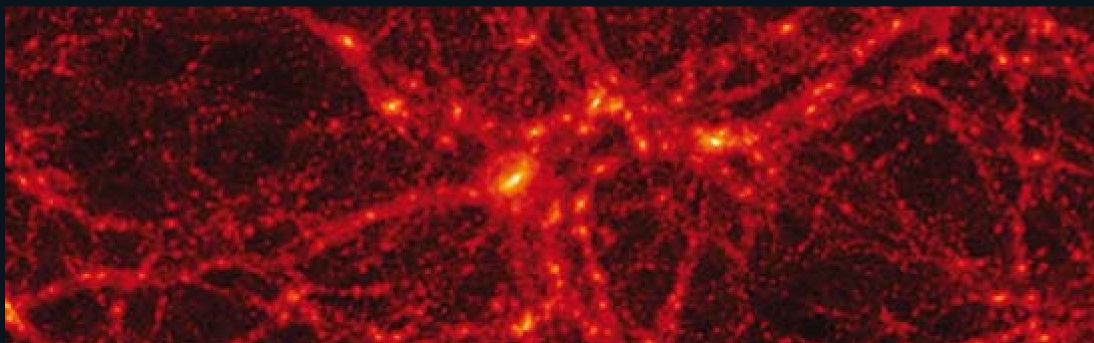
Alejandro Gangui

EN NOVIEMBRE DE 2009...

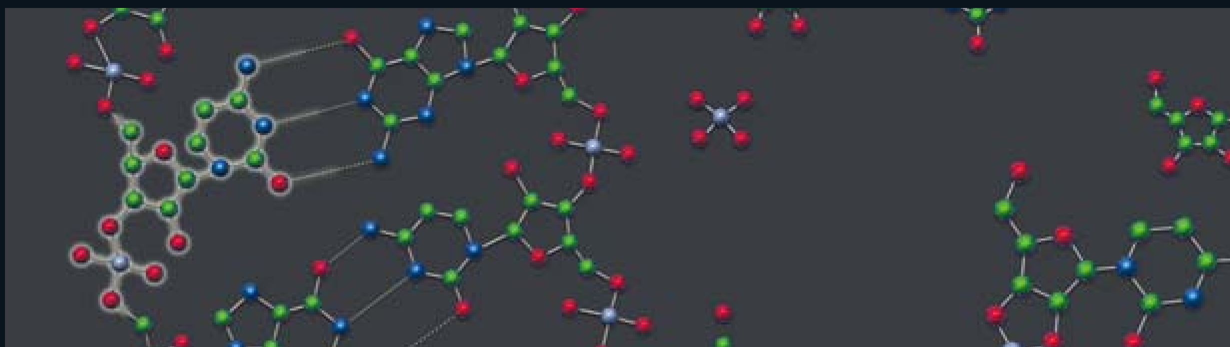
NUMERO MONOGRAFICO Y EXTRAORDINARIO SOBRE LOS

ORIGENES

EL UNIVERSO



LA VIDA



LA MENTE



LA COMPUTACION



Y MAS...